

# **Zamana Dayalı Terahertz Ölçüm ve Görüntüleme Tekniklerinin Geliştirilmesi**

**Proje No: 110T849**

Doç. Dr. Hakan ALTAN

Araştırmacı:

Yard. Doç. Dr. Halil Berberoğlu

Nisan 2014  
ANKARA

## ÖNSÖZ

TUBİTAK ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi, ODTÜ, tarafından desteklenen 110T849 nolu, “Zamana Dayalı Terahertz Ölçüm ve Görüntüleme Tekniklerinin Geliştirilmesi” başlıklı çalışmada zamana dayalı Terahertz (THz) ölçüm ve görüntüleme tekniklerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar iki tip ölçüm tekniğinin geliştirilmesine odaklanmıştır: Farklı malzemelerin THz tayf aralığındaki özellikleri ve foto-uyarı sonrası malzemeler içinde dinamik gelişen olayların anlaşılması. Bu amaçlara ulaşmak için sistem içinde terahertz atımlarını üretmek, iletmek ve belirlemek için kullanılan birimlerin her biri optimize edilmiştir. Ayrıca örneklerin en doğru şekilde karakterize edilebilmeleri için geliştirilen dinamik ve sabit THz ölçüm yöntemlerin sınırları belirlenmiştir. Proje ekibi, TUBİTAK ve ODTÜ'ye katkılarından dolayı teşekkür eder.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
TABLolar LİSTESİ .....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	iv
ÖZET .....	1
ABSTRACT .....	2
1. GİRİŞ .....	3
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
3. ZAMANA DAYALI TERAHERTZ ÖLÇÜM TEKNİĞİ .....	8
3.1. ZAMANA DAYALI TERAHERTZ SPEKTROSKOPİ SİSTEMLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ .....	10
3.2. ZAMAN ÇÖZÜNÜMLÜ TERAHERTZ SPEKTROSKOPİ TEKNİĞİN GELİŞTİRİLMESİ .....	13
3.2. ZAMANA DAYALI TERAHERTZ GÖRÜNTÜLEME TEKNİĞİN GELİŞTİRİLMESİ .....	19
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	24
4.1 ZAMANA DAYALI TERAHERTZ SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ- BİYOLOJİ ARAŞTIRMALARI .....	24
4.1.1. <i>Triptofan Ölçümleri</i> .....	24
4.1.2. <i>Diş ölçümleri</i> .....	27
4.2. ZAMANA DAYALI TERAHERTZ SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ- DALGA KILAVUZU (IZGARA) YAPILARI .....	30
4.3. ZAMANA DAYALI TERAHERTZ SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ- PLAZMA İŞLENMİŞ POLİPROPİLEN .....	34
4.4. ZAMANA DAYALI TERAHERTZ SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ- NANOAKIŞKANLAR .....	36
4.5. ZAMANA DAYALI TERAHERTZ SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ- PETROL ÜRÜNLERİ .....	39
4.6. ZAMANA DAYALI TERAHERTZ SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ- KISA DC DEŞARJ LAMBALARI .....	42
4.7. ZAMANA ÇÖZÜNÜMLÜ TERAHERTZ SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ-POMPA/PROB (SONDA).....	46
5. SONUÇ .....	49
6. REFERANSLAR .....	52

## **TABLÖLAR LİSTESİ**

4.1 Polipropilen Örneklerin Çift RF (Yüksek/Düşük Frekans) Plazma Ortamında İşlendikleri Parametreler.....	34
4.2 Görünür Pompa/THz Prob Sisteminde Farklı Işın Kollarının Hareketine Göre Alınabilecek Ölçüm Çeşitleri.....	46

## ŞEKİLLER LİSTESİ

3.1	ODTÜ'deki laboratuvarlarımızda kurulan THz spektroskop sistemlerinin şeması.....	9
3.2	Lazer ve terahertz sistem fotoğrafları.....	10
3.3	THz üretici fotoiletken anten yapısı.....	11
3.4	Geliştirilen THz sistem şeması (ODTÜ).....	12
3.5	Örnek THz Ölçümü-Ti:Yakut Lazer destekli sistem (ODTÜ).....	13
3.6	Lazer sistem şeması (UNAM).....	15
3.7	Pompa/Prob (sonda) THz sistem şeması (UNAM).....	17
3.8	Pompa/Prob (sonda) THz sistem şeması (UNAM).....	18
3.9	Örnek THz Ölçümü-Yükseltilmiş Ti:Yakut Lazer destekli sistem (UNAM) .....	18
3.10	Kip kilitli Fiber lazer sürümlü THz sistemi Görüntüleme İçin (ODTÜ) .....	20
3.11	Görüntüleme için kullanılan THz üretici fotoiletken anten yapısı (ODTÜ) .....	21
3.12	Noktasal ölçümler için geliştirilen THz sistem şeması (ODTÜ) .....	22
3.13	Örnek THz Ölçümü-Er:katkılı fiber lazer destekli sistem (ODTÜ) .....	22
3.14	3B Görüntüleme için geliştirilen sistem şema ve fotoğrafı (ODTÜ) .....	23
3.15	Görüntüleme için katmanlı yapılardan beklenen THz darbe profilleri (ODTÜ).....	23
4.1.1	Farklı konsantrasyonlarda L-triptofan içinden geçen THz atım profilleri.....	25
4.1.2	Farklı konsantrasyonlarda L-triptofan kırılım indisleri.....	26
4.1.3	Farklı konsantrasyonlarda L-triptofan soğurma katsayıları.....	26

4.1.4	Süt ve yetişkin diş örnekleri.....	27
4.1.5	Yaş ve kuru diş örneklerin soğurma spektrumları ve kırılım indisleri.....	28
4.1.6	Çürük ve sağlıklı (a) süt dişi (b) yetişkin dişi örneklerinin kırılma indisleri.....	28
4.1.7	Çürük ve sağlıklı (a) süt dişi (b) yetişkin dişi örneklerinin soğurma spektrumları	29
4.1.8	Yetişkin bir diş örneğinin (a)ölçülen sağlıklı ve çürük kısımları,(b) kırılma indisleri (c) soğurma spektrumları.....	29
4.2.1	Dikroik filtre/Dalga Kılavuz Yapısı.....	30
4.2.2	Dikroik filtrede yer alan tek bir delik ve deliklerin birbirine göre pozisyonu .....	31
4.2.3	Dikroik filtrenin şematik gösterimi.....	31
4.2.4	Dikroik filtrenin s,d ve l parametreleri ile hesaplanan geçiş spektrumu .....	32
4.2.5	Filtre varken ve yokken alınan terahertz profilleri.....	33
4.2.6	Deneyisel verilerin hesaplanmış veriler ile karşılaştırılması .....	33
4.3.1	Tablo 1’de listelenen polipropilen örneklerin kırılım indisleri.....	35
4.3.2	Tablo 1’de listelenen polipropilen örneklerin soğurma profilleri .....	35
4.3.3	Düşük güçte (Düşük Frekans 50/Yüksek Frekans 100W) işleme zamanına (30/60dk) göre elde edilen XRD grafikleri.....	36
4.4.1	ODTÜ’de aygıt soğutma sistemlerini incelemek amacıyla üretilen mikro-ölçekli kanallar.....	37
4.4.2	2-propanol içindeki Cu nanoparçacıkların zaman dayalı THz atım profil geçişi .....	38
4.5.1	Kuvars küvet içinde yerleştirilen benzin örneklerinden elde edilen THz puls (a) geçiş değerleri.....	40
4.5.1	Dizel sıvının kırılım indisi 95 ve 97 oktan benzine göre çok daha farklı (b) .....	40
4.5.1	Etanol katkılı benzin karışımlarının hesaplanan permittivity değerleri(siyah (c) daireler).....	41
4.5.1	Kırmızı noktalar önerilen modelden hesaplanan etanol (d) miktarıdır.....	41
4.6.1	Neon indikatör lamba.....	42
4.6.2	Voltaj uygulanan GDD .....	43

4.6.3	GDD içerisinde ki plazmanın abnormal bölgede çalıştığını gösteren akım-voltaj grafiği.....	44
4.6.4	THz sistemi ile alınan (a) hava ölçümünün terahertz görüntüsü (b) kapalı ve açık GDD ölçümlerinin terahertz görüntüsü .....	44
4.6.5	GDD açık/kapalı Güç spektrumu grafikleri .....	45
4.6.6	Terahertz dalgasının 0.05 THz-0.5 THz aralığında GDD içinden geçiş spektrumu.....	45
4.7.1	Pompa enerjisine bağlı olarak GaAs sinyalinde görülen değişim.....	48
4.7.2	Kuantum kuyu yapısı.....	48
4.7.3	Kuantum kuyu örneklerinin normalize edilmiş sonuçları .....	49

## ÖZET

Terahertz (THz) dalga boylarına dayanan teknolojiler ve uygulamalar günümüzde yoğun ilgi ile izlenmektedir. Bahsi geçen teknolojiler, günümüz fizik laboratuvarlarında yaygın bir şekilde uygulanmakta olan lazer optiği, malzeme fiziği ve çok hızlı fotonik konularına da ışık tutmaktadır. Bu çeşitli uygulamalar arasında en iyi sonuç alınan yöntemler, atmalı THz spektroskop sistemlerinin geliştirilmesi ve bunların yalıtkan ve yarı-iletken malzemelerdeki uygulamaları ile THz görüntüleme sistemleri ve uygulamaları olmuştur. Atmalı THz spektroskop sistemlerinde üretilen pikosaniye uzunluklardaki THz darbeleri sayesinde bilim insanları hem maddelerin gerçek ve sanal dielektrik katsayılarını anında ölçebilir hem de madde içi dinamik gelişen olayları daha iyi anlayabilmektedirler. THz fotonlarının enerjileri bir kaç meV olduğundan, THz fotonlarıyla sadece yarı-iletken maddelerde değil canlı ve cansız dokularda ve kimyevi/biyolojik maddelerde de dinamik ölçümler gerçekleştirilebilir. Bu proje kapsamında ilk olarak mevcut Terahertz ölçüm sistemlerimizi organik-inorganik, katı-sıvı, iletken-yalıtkan, plazma gibi farklı malzeme türlerine uygulayarak farklı ölçüm kabiliyetleri kazandık.

Geliştirdiğimiz teknikler ve elde edindiğimiz bilgiler malzeme karakterizasyon grupları için önemli bir katkı sağladı. İkinci olarak, örnekleri sadece tek boyutta değil üç boyutta inceleyebilen sistemler geliştirdik. Son olarak, bu dalga boylarında farklı malzeme türlerindeki foto-uyarı sonrası değişimleri anlık olarak gözlemleyebilen özgün bir sistem geliştirdik. Dünyada sayılı ülkelerde geliştirilen bu ölçüm yeteneğini ülkemizde ilk defa bu proje kapsamında yapılan destek sayesinde kazanabildik. Geliştirdiğimiz sistemler ve teknikler birçok araştırmacı için faydalı olmuştur. Elde edilen sonuçlar sırasıyla:

- Motorin ve benzin arasında belirgin farkların tespiti ve açıklanması
- Benzindeki etanol gibi katkı maddelerinin tespiti ve etkisi
- Triptofan amino asitin farklı konsantrasyonlarda yeni yöntemler geliştirilerek tespiti
- Polimerlerin plazma ortamında güçlendirilmesi ve karakterizasyonu
- Deşarj lambalarının THz ışınlarını tespit edebilmesi
- Yarı-iletken tabanlı malzemelerin foto-uyarı sonrası tepkileri
- Diş ve deri gibi biyolojik dokuların incelenmesi ve üç boyutta görüntülenebilmesi
- Dalga kılavuz tipi ızgara yapılarda frekansa dayalı THz geçişlerini etkileyen parametrelerin belirlenmesi

**Anahtar Kelimeler:** Zamana dayalı terahertz ölçüm teknikleri, Zamana dayalı terahertz görüntüleme teknikleri, Zaman Çözünümlü Terahertz Ölçüm Tekniği (görünür pompa/THz prob), THz Dalga kılavuzları



## ABSTRACT

Technologies and applications based on terahertz (THz) waves are being followed today with great interest. These technologies are shedding light on many applications being researched in today's Physics laboratories such as laser optics, material science and ultra fast photonics. Undoubtedly, the most successful of these applications has been in the development of time-domain terahertz spectroscopic and imaging systems which has been utilized in the characterization of dielectrics and semiconductors. This pulsed technique has allowed users to not only characterize the real and imaginary dielectric function of these materials at the same time, but also their dynamical behavior; which given the energy of the terahertz waves (few meV) can be used to study a plethora of energetic events in these systems. In this project first we applied our existing Terahertz measurement systems towards characterizing a wide variety of materials such as organic-inorganic materials, solids-liquids, conductors-dielectrics, as well as plasmas and in doing so we were able to gain expertise in a wide variety of measurement techniques. The techniques we developed and the knowledge we have gained has been invaluable to many groups involved in material characterization. Second, we developed methods to not only analyze samples in one dimension but in all three dimensions. And lastly, we developed novel systems that measure the dynamical response of samples at these wavelengths after photoexcitation. Developed in all but a few countries in the world, we were able to establish this measurement technique in our own country. The systems and measurement techniques we developed as a result of this project has benefited many researchers. The results we have achieved in order:

- Discern and explain differences between diesel and regular unleaded gas
- Determine the effect and amount of additives such as ethanol in gas
- Concentration based measurements of tryptophan using novel methods
- Understanding increase in structural strength of polymers after plasma treatments
- Observing that discharge lamps can detect THz waves
- Understanding the response of semiconductors after photoexcitation
- Examining the potential for three dimensional imaging of teeth and skin
- Understanding which parameters effect the THz transmission through waveguides based on periodic structures

**Keywords:** Time Domain Terahertz Spectroscopy, Time-domain Imaging Techniques, Time-Resolved Terahertz Measurement Techniques (visible pump/THz probe), THz waveguide structures

## 1. GİRİŞ

Elektromanyetik spektrumun 0,3 ile 10 THz frekans aralığındaki bölgeye Terahertz dalgaları veya T-ışını (THz) denir [Kawase 2004; Tonouchi 2007]. Terahertz ışıması, elektromanyetik spektrumun diğer bölümlerinde bulunmayan benzersiz özelliklere sahiptir. Terahertz dalgaboyunun düşük foton enerjisi ( $1 \text{ THz} = 4,1 \text{ meV}$ ) X-ışının sahip olduğu enerjinin milyonda biri kadardır. İnsan vücuduna temas ettiği zaman atomları iyonlaştırmadığından biyolojik dokuların zarar görmesini engeller. THz dalgalarının kullanımı terahertz zaman aralığı spektroskopisi, terörizm ve kaçakçılığa karşı saptama, doğal ve endüstriyel sensörler, tahribatsız muayene, savaş alanı gözetleme, hava alanı iniş sistemleri, kimyasal savaş maddeleri saptanması, görüntülenmesi ve hava alanı güvenliği gibi geniş bir alanı kapsar. Terahertz dalga boyları optik ve katı-hal fiziğe dayalı birçok olayın incelenmesinde önemli rol oynar. Örneğin yarıiletken ve kristal benzeri maddelerdeki kafes ("lattice") vibrasyonları, bağımsız elektron soğurması ("free-carrier absorption") gibi özellikler ve gaz ya da sıvı hal maddelerdeki dönüşlü ve titreşimsel soğurma olayları terahertz dalga boylarının frekanslarına denk düşer. Bu uygulamalara ek olarak THz spektroskop sistemleri, sağlıklı dokulardan bazal hücre kanserinin ayırt edilmesinde [Woodward vd. 2003], patlayıcıların algılanmasında [Shen vd. 2005], uyuşturucu ve silahların detekte edilmesinde [Federici vd. 2005] kullanılmaktadır.

Tarihsel olarak THz ışıması; termal kaynaklar, ark-deşarj lambaları ve gaz lambaları (civa gibi) kullanarak elde edilmiştir. Eş-fazlı THz kaynakları lazerin icadından sonra geliştirilmiştir, ilk örnekler: moleküler lazerler (HCN,  $\text{O}_2$  gibi) ve serbest elektron lazerler kullanılarak elde edilmiştir. Son 30 sene içinde çok hızlı atım üreten puslu lazerlerin yaygınlaşması ve çizgisel olmayan optik yöntemlerin geliştirilmesiyle iki-renk foto karıştırıcı ve çok hızlı lazer pulslarının dönüşümü (Zamana Dayalı Terahertz Spektroskop Sistemleri) teknikleri sayesinde daha kompakt eş-fazlı THz ışın kaynakları geliştirilmiştir.

Zamana Dayalı Terahertz Spektroskop tekniği ile uzak kızıl ötesi alanındaki öbür ölçüm yöntemleri karşılaştırıldığında (Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), vs.) en önemli avantajlarından biri terahertz ışınlarının elektrik alanlarının ölçülebilmesidir. Fourier bileşenlerinin hem genlik hem de fazlarını ölçebildiğimiz için incelenen materyalinin hem soğurma niteliklerini hem de kırılım indisini deneysel olarak aynı anda belirleyebilmekteyiz. Örneğin optik titreşimlerinin ("optical phonons") soğurma ve iletkenliğe olan etkilerini ya da bağımsız elektronlarının iletken banttan valans banda olan dinlenme süreçleri THz darbeleri ile kolaylıkla incelenebilir. Bu ölçüm özellikleri sayesinde THz spektroskop sistemleri birçok yerde madde tanımlama tipi uygulamalarında kullanılmaktadır. Birçok tehlikeli biyolojik ve kimyasal savaş ajanlarının parmak izi diye adlandırılan birbirlerini ve zararlı olmayan

maddelerden fark kılan özellikleri 0,3-10THz bant arası yer aldığı kanıtlanmıştır. Son yıllarda yaptığımız çalışmalar sonucunda Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik bölümü laboratuvarlarında ülkemizdeki ilk terahertz spektrometre sistemlerini geliştirdik (bkz. TUBITAK 107T742 Proje Sonuç Raporu, 2011). Kurulan bu sistemin geliştirilmesi, yeni sistemlerin kurulması ve genel olarak THz ölçüm tekniklerin iyileştirilmesi için bu proje kapsamında çalışmalar gerçekleştirdik. Önerilen projenin ana konusu, atımlı Terahertz spektroskopi sistemlerinde dinamik ölçüm yeteneğinin geliştirilmesi ve bu teknikleri kullanarak örneklerin zamana dayalı parametrelerinin ölçülmesi ile terahertz ölçüm/görüntüleme tekniklerinin geliştirilmesidir.

Proje çalışmasında mevcut terahertz spektroskop sistemlerinde kullanılan tek boyutlu (noktasal) ölçüm tekniklerinin iyileştirilmesi, çift-boyutlu ölçüm tekniklerinin (görüntüleme) geliştirilmesi ve zamana dayalı (pump/probe) ölçüm becerisinin kazanılması amaçlamaktadır. Yapılan çalışmalar üç ana grupta özetlenebilir:

Noktasal ölçüm tekniğinin iyileştirilmesi: Farklı örnekleri (yarı-iletken, sıvılar, biyolojik malzemeler vb.) karakterize edebilmek için ölçüm hassasiyetinin iyileştirilmesi ve örnekler ile THz ışınların etkileşimlerini arttıracak yeni ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesi

Zamana dayalı görüntüleme tekniklerinin geliştirilmesi: Noktasal ölçüm yapabilen atmalı THz spektroskop sistemlerinde, THz ışınını cisim üzerinde ya da cismi THz ışını etrafında gezdirerek cisimleri üç boyutta analiz edebilmek ve böylelikle cisimleri THz frekanslarında görüntüleyebilen bir sistem tasarladık ve geliştirdik.

Zamana dayalı ölçüm yeteneğinin (pompa/prob) geliştirilmesi: THz atımları pikosaniye mertebesinde olduğundan foto uyarı sonrası dinamik gelişen olayların ölçümü için özel tekniklerin geliştirilmesi. Burada THz ışınlarına duyarlı yapıların dinamik ölçümlerinin karakterize edilmesi için bir sistem geliştirdik. Frekansı ayarlanabilir bir foto-uyarı kaynağı sayesinde birçok farklı maddeyi karakterize edebileceğimiz için bu tip dinamik ölçüm alabilen THz spektroskop sistemini Ulusal Nanoteknoloji Merkezi (Bilkent üniversitesi, Ankara) bünyesinde bulunan OPA (çizgisel olmayan optik parametrik yükseltici) ile desteklenmiş yükseltilmiş Ti:Yakut sistemini kullanarak kurduk.

Yapılan bu çalışmalar sonucunda terahertz alanında önemli sonuçlar elde ettik. Elde ettiğimiz sonuçlar şöyle özetlenebilir: Türkiye'nin ilk yükseltilmiş ultrafast lazer pompa/THz prob (sonda) sistemini kurduk. ODTÜ-THz Araştırma Laboratuvarında geliştirdiğimiz THz spektroskop sistemlerini iyileştirerek biyoloji, kimya ve THz aygıt geliştirme alanlarında yenilikçi

alışmalar gerçekleştirdik ve çalışmalarımızı saygın dergilerde yayınladık. Spektroskop sistemlerini geliştirerek cisimleri üç boyutta tarayabilen THz görüntüleme sistemleri oluşturduk. Proje kapsamında bursiyer olarak desteklenen iki yüksek lisans öğrencisinden biri tezini başarıyla savunduktan sonra doktora çalışmalarını yurtdışında halen sürdürmektedir. Proje kapsamında geliştirilen teknikler sayesinde birçok öğrenciye destek olunmuştur. Bu çalışmaların detayları bu raporda anlatılmaktadır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Zamana dayalı terahertz ölçüm tekniğinde çok kısa puls üreten ultrafast lazerlere ihtiyaç duyulmaktadır. Yükseltilmiş ve yükseltilmemiş Ti: Yakut lazerlerinin terahertz sistemlerinde denendiğı ve bu çalışmalar sayesinde biyoloji, kimya, fizik, metalürji ve başka temel bilim alanlarında önemli katkılar sağlandığı görölmektedir [Schmittenmaer 2004]. Bu sistemleri kullanarak hem fotoiletken antenlerle hem de kristal yapılar ile terahertz üretimi ve tespiti çalışmaları başarıyla gerçekleştirilmiştir [Suzuki vd. 2006; Otake vd. 2000; Takahashi vd. 2003]. Terahertz spektroskopi sistemlerinin Ti: Yakut lazerine bağıli gelişmelerinden dolayı optikal rektifikasyon ile terahertz üretimi yapabilen kristallerin ~800nm dalga boyundaki eşitleri azdır. Üretilen THz atımın çizgisel olmayan bir orantılı ile gelen görünür atımı elektrik genliğıne orantılıdır  $P_{THz}^{(2)}(t) \propto \chi^{(2)} E_{vis}^2(t)$ , ve ZnTe kristali 800nm dalga boyundan THz dalga boyuna yüksek bir dönüşüm oranına sahip ender kristallerden birdir ( $1E^{-6}$ ). ZnTe kristalinin bir başka özelliğı ise kırılma indisinin hem THz hem de görünür bölgelerinde neredeyse eşdeğer olmasıdır. ZnTe dışında GaSe ve GaP tipi kristaller de THz üretimi için kullanılmaktadır [Rice vd. 1994; Han vd. 2001]. Yükseltilmiş lazer sistemlerinde üretilen atım enerjileri mJ mertebesinde olduğundan foto-iletken anten yerine kristal üretim teknikleri tercih edilmektedir. Ek olarak foto-iletken anten üretimi 150fs altındaki görünür atım süresine duyarlı olmadığı için elde edilen THz bant genliğı kısa ve uzun atımlar için değışmemektedir ve genelde 3 THz gibi bir bant genliğı sınırlaması söz konusudur. Bu nedenle 100fs altında uzunlukları olan görünür atımlar ile THz üretim teknikleri arasında kristal üretim tekniğı tercih edilmektedir. Dönüşüm sonrası üretilen THz darbe uzunlukları antene göre daha kısa olduğundan daha geniş bir THz bantı elde edilir. ZnTe kristalleri ve yükseltilmemiş femtosaniye lazerler (osilatör) ile bant genliğı 4THz'e kadar uzanmıştır [Altan vd. 2006].

Geniş bir bantın bir başka avantajı ise daha kısa bir THz atım süresi elde edildiğinden "pump/probe" tipi zamana dayalı ölçüm teknikleri için elverişli olmasıdır. Bu tip bir yaklaşımla, 50fs-altı atım üreten yükseltilmiş Ti:Yakut lazerler kullanarak 30THz'e kadar uzanan bir THz

bant genişliği elde edilmiştir [Huber vd. 2008]. Bu tip üretim tekniklerinin literatürde daha sık rastlanmamasının nedeni THz güç dönüşüm oranının çok daha az olmasıdır. Ayrıca, bu tip kısa bir THz atması elde etmek için kullanılan ZnTe kristal kalınlığı 10 mikron'dan daha az olduğu için titreşim vb. unsurlar sistem ile yapılan ölçümleri olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle genelde kullanılan kristal kalınlıkları 1 ile 2mm arasında değişmektedir.

Terahertz spektroskop sistemleri ile birçok farklı malzeme üzerinde soğurma ve kırılma indisi ölçümleri gerçekleştirilmiştir [Auston vd. 1984; Auston vd. 1988; Zhang vd. 1992; Brener vd. 1996]. Yarı-iletkenlerde önceden belirtildiği gibi serbest elektronların bant-içi geçiş enerjileri (intra-band transition) THz foton enerjisine denk düştüğünden birçok ham yarı-iletken maddenin optik ve elektriksel özellikleri karakterize edilmiştir [Nuss vd. 1998]. Yakın zamanda bu yöntemler nanomateriyallerin teşhisi için de geliştirilmiştir [Altan vd. 2004]. Laboratuvarlarda sentezlenen birçok malzeme örnekleri ince tabakalar halinde üretildikleri için THz spektroskop sistemlerin ölçümlerini gerçekleştirmek için özel yöntemlere başvurmak gerekmektedir. Özellikle biyolojik ve kimyasal maddelerin tayf ölçümlerinde THz ışın gücü polar yapıya sahip moleküllerden çok azalarak geçtiği için biyolojik tabanlı malzemeler ya kurutulmaktadır ya da polar yapıya sahip olmayan bir sıvı (metanol) [Yu vd. 2004] ile ölçüm öncesi macun haline getirilmektedir. Bu tip biyolojik ve kimyasal moleküllerden alınan soğurma bilgileri, madde içi moleküllerin dönüşümlü modları (düşük enerji, molekül içi modlar) ya da diğer düşük enerji modlara bağlıdır (moleküller arası etkileşimler). Isıya, basınca ve diğer çevresel faktörlere bağlı olarak incelenebilen soğurma profilleri (lineshapes) sayesinde bu maddelerin biyolojik veya kimyasal sistemlerde nasıl bir rol üstlendikleri yapılan THz ölçümleri sayesinde ortaya çıkmıştır [Siegel vd. 2004; Markelz vd. 2002; Fischer vd. 2002; Han vd. 2000; Fitzgerald vd. 2003; Brucherseifer vd. 2002].

THz dalga boyları ile ince film veya nano-materyal tipi malzemeler üzerinde yapılan çalışmalarda THz dalga boyu incelenen örnek, kalınlığından çok daha büyük olduğu için örneklerin soğurma profilleri geleneksel yöntemler kullanılarak doğru ölçülememektedir. Bu nedenle son iki yılda incelenmesi istenilen ince yapı örnekler ile THz darbenin etkileşimini arttırmak için daha egzotik yöntemler geliştirilmiştir [Wang ve Mittleman 2004]. Bu ölçümler arasında projede bahsedilen ve yapılması istenilen THz dalga kılavuzu yöntemi öbür yöntemlere göre, iletişim teknolojilerinde olası kullanımı nedeniyle daha ilgi çekmiştir [Fitch ve Osiander 2004; Köhler vd. 2003; Siegel 2002]. Dalga kılavuzu yönteminin özünde mikrodalga sistemlerinde sık rastlanan içi boş metal dalga kılavuzlarını kullanarak, THz atımın incelenecek madde içinden dağılmadan ilerlemesini sağlayacak optik yolun oluşturulması yer almaktadır [Bowden vd. 2008]. Dalga kılavuzu yöntemi ince tabanlı malzemelerin ölçümü için önemli bir teknik olarak hızla gelişmektedir. Dalga kılavuzun şekli, iç çapı ve uzunluğu THz atım profilini

doğrudan etkilemektedir. Önerilen dalga kılavuzu teknikleri sayesinde, FTIR gibi yöntemlerin eksik kaldığı yerlerde, THz spektroskop ölçümleri maddelerdeki fiziksel olayların daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.

Spektroskop ölçümlerine ek olarak bu tip atmalı THz sistemleri ile cisimlerin üç-boyutlu görüntülenmeleri üzerine yapılan çalışmalar da başarıyla sonuçlanmıştır. THz görüntülemesi ilk olarak 1995'te rapor edilmiştir [Hu ve Nuss 1995]. Toz yapıya sahip malzemeler [Hermann vd. 2002], kavisli yüzeyler [Hasegawa vd. 2003] ve biyomedikal dokular [Woodward vd. 2003] türünde nesneler görüntülenmiştir. Görüntü sistemlerinde noktasal ya da 2 boyutlu tespit etme tekniğine göre algılamada kullanılan aygıtlar ya tek ya da dizi halinde kullanılmaktadır. Örneğin hareket ettirilmesi ve bu esnada da THz demetinin örnek üzerine odaklanması yöntemiyle örnek taraması yaptırılır. Nokta detektör yerine bir dizi detektör sistemi (array) [Nahata vd. 2002; Usami vd. 2002], veya bir dizi kaynak ve tek detektör kullanarak, görüntüleri 2D olarak uyumlu bir şekilde eş zamanlı toplamak mümkündür [Xu ve Zhang 2006]. Uzaysal (konuma bağlı) çözünürlük normalde dalga boyu (Rayleigh kriteri) mertebesinde, ancak a) mesafe ayarlaması, b) yakın-alan optik mikroskop taraması [Chen vd. 2003; Buersegers vd. 2006] veya c) odaklayıcı taramalı mikroskop yöntemleriyle uzaysal çözünürlük indirgene bilinir. Bu yöntemler kullanılarak yanıkların bez altından görüntülenmesi, deri kanserlerinin teşhisi ve yağ-kas dokularını ayırt ederek görüntülenmesi gibi biyolojik uygulamalar da son senelerde gelişmiştir [Woodward vd. 2003; Singh vd. 2008].

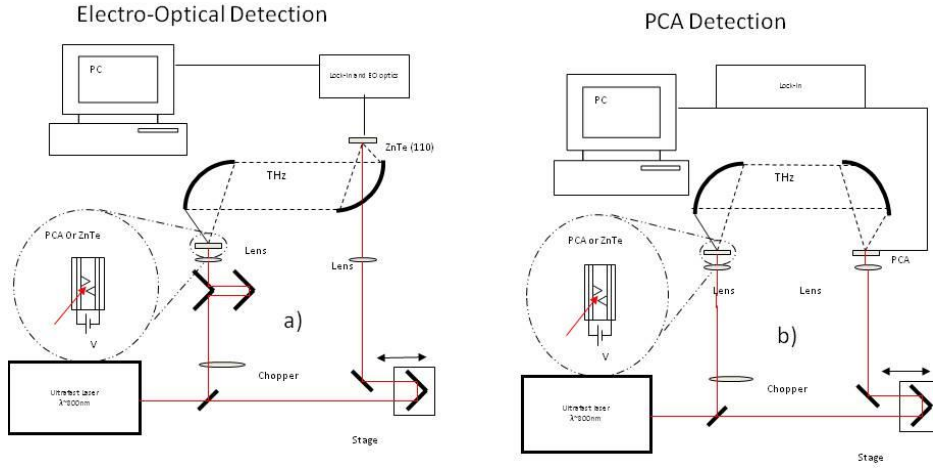
Yukarıda bahsedilen uygulamalar madde içindeki dinamik olayları ölçmekten uzak kalmaktadır. Oysaki atmalı THz sistemlerin öbür uzak kızıl ötesi ölçüm yöntemlerine göre (FTIR gibi) en önemli avantajı dinamik ölçüm kabiliyetidir. Pikosaniye süreçteki atımlar sayesinde farklı madde türleri (biyolojik, kimyasal, yarı-iletken) içinde birçok düşük enerji ile uyarılan hallerin dinamik gelişimini gözlemlemek mümkün olmakla beraber madde içi fiziksel olayları daha iyi anlamamızı sağlamaktadır. Bu tip ölçüm yeteneği elektromanyetik spektrumun diğer alanlarında (görünür ve mor ötesi bölgelerinde) başarıyla uygulanmıştır. "Pump/probe" diye adlandırılan bu çalışmalar THz bölgesinde de olumlu sonuçlar vermiştir. Yalıtkanlar, iletkenler ve yarı-iletkenlerdeki yüklerin nasıl hareket ettikleri, exciton, polaron (elektron ve fonon etkileşimleri) gibi zamansal değişen elektriksel parametrelerin ölçümleri başarıyla gerçekleştirilmiştir [Knoesel vd. 2001; Knoesel vd. 2004; Shan vd. 2003; Wang vd. 2004; Hendry vd. 2004].

Bu tip uygulamalarda üç farklı ölçüm yöntemi geliştirilmiştir: İlk ikisi, 1 boyutta ve 2 boyutta dinamik ölçüm olarak nitelendirilmiştir [Schmittenmaer 2004]. Tek boyutta yapılan çalışmalarda THz atımı sabit tutulurken pompalama atımının THz atımına göre örneğe geliş

zamanları değiştirilir. Böylelikle tek bir THz frekansında madde içi dinamik olayları gözlemleyebilmekteyiz. İki boyutlu çalışmalarda ise pompalama atımın THz atımına göre farklı geliş zamanlarında THz profilinin tamamı taranarak elde edilir ve böylelikle frekansa bağlı olarak dinamik olayların nasıl geliştiğini gözlemleyebiliriz. Üçüncü yöntem ise daha az bilinen ama bir örneğin elektriksel karakteristiklerini ölçmek için kullanılan en iyi yöntemlerden birisi olan 2 boyutlu diferansiyel pump/probe ölçüm düzenidir [Schmittenmaer 2004]. Burada incelenen örnek üzerinde hem pompa atması varken hem de pompa atması yokken 2-boyutlu ölçüm alınır. Alınan her iki taramanın sinyal farkı işlenir ve böylelikle sadece foto-iletkenlik sonucu madde içi parametreler elde edilir. Örneğin bir yarı-iletken maddenin foto-uyarı sonrası mobilitesinin nasıl değiştiğini ancak bu yöntem ile anlayabiliriz [Beard vd. 2001].

### **3. ZAMANA DAYALI TERAHERTZ ÖLÇÜM TEKNİĞİ**

ODTÜ Fizik bölümünde Terahertz Araştırma Laboratuvarında başarıyla sonuçlandırılan TUBITAK/SANTEZ destekli projelerimiz kapsamında ve üniversitenin kendi kaynaklarıyla terahertz spektrometre sistemleri geliştirilmiştir. Şekil 3.1’de kurmuş olduğumuz bir çeşit sistemin örneği gösterilmektedir. Atmalı THz spektrometre sistemlerde temel olarak atmalı bir görünür (veya kızılötesi) lazer kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. THz atım üretim teknikleri (Auston şalteri veya çizgisel olmayan frekans farkı çarpım yöntemi) görünür atımın süresine bağlı olduğu için femtosaniye atımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Tarihsel olarak ilk femtosaniye atım üreten lazerler yakın kırmızı altı bölgesinde çalıştığından (800nm civarı), THz üreten ve algılayan cihazların temeli bu bölgede çalışan maddelere dayandırılmıştır. Örnek olarak fotoiletken anten yapılarında (Auston şalteri) için GaAs ve benzeri madde türleri; çizgisel olmayan frekans farkı çarpım tekniklerinde ise ZnTe tipi geniş bant geçisine sahip kristaller kullanılmıştır ve halen kullanılmaktadır.



**Şekil 3.1.** ODTÜ'deki laboratuvarlarımızda kurulan THz spektroskop sistemlerinin şeması. Bu sistemde görüldüğü gibi Ti: Yakut lazerinden elde edilen kısa görünür atmalar, 800nm orta dalga boyunda olduğundan a) ve b) şemalarında ya <110> konumundaki ZnTe kristalini ya da GaAs alt taslarına dayanan, AC gerilim altındaki dipol antenlerini aydınlatır.

Kristal üretim tekniğinde (optik rektifikasyon), THz atımın çizgisel olmayan bir orantı ile gelen görünür atımı elektrik genliğine orantılıdır,

$$P_{THz}^{(2)}(t) \propto \chi^{(2)} E_{vis}^2(t)$$

ZnTe kristalinin bir başka özelliği ise kırılma indisinin hem THz hem de görünür bölgelerinde (800nm dalga boyu civarı) neredeyse eşdeğer olmasıdır. Anten üretim tekniğinde, dipol antenlerinde (PCA) oluşan anlık elektron akımı THz atmasının antenden çıkmasına yol açar. Anten üretimine göre dönüşüm oranı daha düşük ( $10^{-4}$  (fotoiletken antenler) -  $10^{-6}$  (optik-rektifikasyon)), ama üretilen THz atımları süreç olarak anten ile üretilen atmalara göre daha kısa olduğundan elde edilen THz tayf spektrumu da daha geniş olmaktadır.

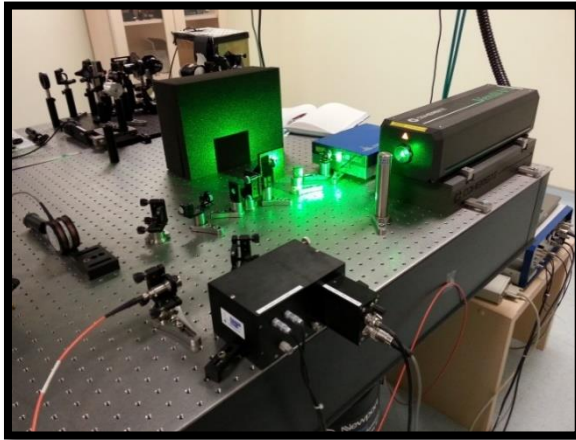
THz atmaların tekrarlama oranı Ti: Yakut lazeri ile aynıdır, bu da yaklaşık olarak 75MHz'tir. Bu atmalar, 50mm çaplı parabolik bir ayna sayesinde paralel ilerleyen 50mm çaplı bir ışın haline getirilir. Bu ışınlar ikinci bir 50mm çaplı parabolik ayna sayesinde ya şekil b)'de gösterildiği gibi ikinci bir GaAs alt taslı antene (Fotoiletken Anten-Photoconductive Antenna (PCA)) odaklanır ya da şekil a)'da gösterildiği gibi elektro-optik belirleme yöntemi ile tespit edilir. Şekil 3.1b)'de antende dipol arası oluşan gerilim THz atma elektrik alanı ile doğru orantılıdır. Bu gerilimi lock-in ölçer aygıtı sayesinde faza duyarlı bir şekilde ölçerek THz atım görüntüsünü elde ederiz. Şekil 3.1a)'da THz atımları ZnTe kristaline odaklanır, buradan geçen doğrusal kutuplaşması olan bir görünür atım THz elektrik alanının yarattığı anlık çift kırılım etkisi yüzünden eliptik kutuplaşması olan bir atıma dönüşür. Yatay ve dikey kutuplaşma eksenlerindeki elektrik alan güçleri dengeli fotodiyot ve lock-in ölçüm aygıtı sayesinde faza duyarlı bir şekilde belirlenir ve böylelikle THz atım elektrik alan şeklini elde etmiş oluruz.



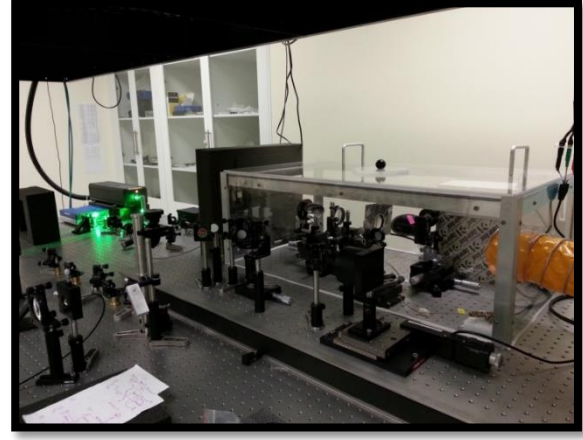
Zamana dayalı terahertz ölçüm tekniğinin uzak kızıl ötesi alanındaki öbür yöntemlerle karşılaştırıldığında (Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), vs.) en önemli avantajı terahertz atılımlarının elektrik alanlarının ölçülebilmesidir. Fourier bileşenlerinin hem genlik hem de fazlarını ölçebildiğimiz için incelenen materyalinin hem soğurma niteliklerini hem de kırılım indisini deneysel olarak aynı anda belirleyebiliriz. Aşağıda ilk olarak sistemlerin ve ölçü tekniklerin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar anlatılacak, sonrasında bulgular ve son olarak sonuçlar tartışılacak.

### 3.1. Zamana Dayalı Terahertz Spektroskopi Sistemlerin İyileştirilmesi

ODTÜ Fizik Bölümü Terahertz Araştırma Laboratuvarı'nda kurulumu gerçekleşen zamana dayalı terahertz spektroskopi sistemi ile biyolojik, kimyasal ve yarı-iletken yapıdaki örneklerin yanı sıra nanomalzemelerin ve metamateryallerin de ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu sistem için kaynak olarak kip-kilitli titanyum safir lazer kullanılmaktadır. 300mW ortalama güç, 75MHz tekrarlama frekansı ve 15fs atım süresi olan bu lazer Şekil 3.2(a)'da gösterilmektedir.



(a)

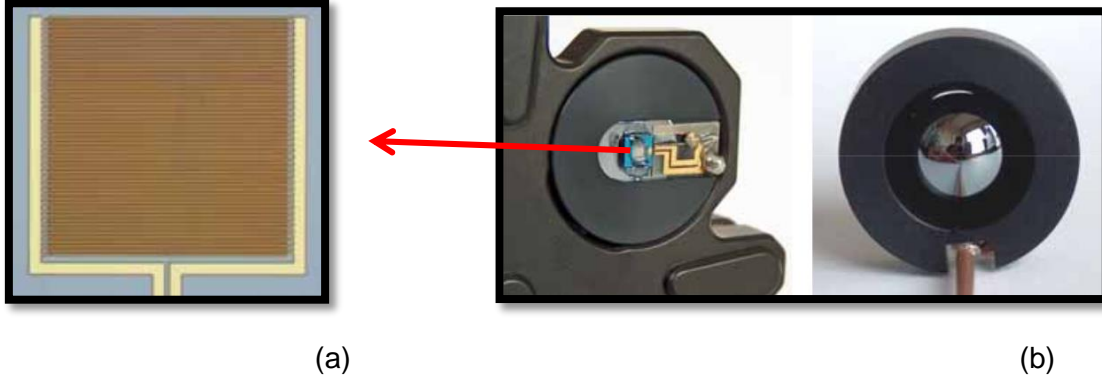


(b)

**Şekil 3.2.** (a) Kip-kilitli titanyum safir lazer (b) Zamana dayalı terahertz sistemi ve lazer kaynağı

Sistemin ve kaynağın laboratuvar içerisindeki yerleşimi de Şekil 3.2(b)'de verilmiştir. 800nm dalga boyunda ki ışın 95:5 oranlı ışın ayırıcı ile sisteme girmektedir. Bu ışın ayırıcı yardımı ile ikiye ayrılan ışın ile sistemin üretim ve algılama kolları başlamaktadır. Üretim için yüksek, algılama için ise düşük güç gerekli olduğu için ışın ayırıcıdan geçen ışın üretim koluna verilirken, yansıyan ışın belirleme koluna verilmektedir. Üretim kolunda ışın bir lens yardımı

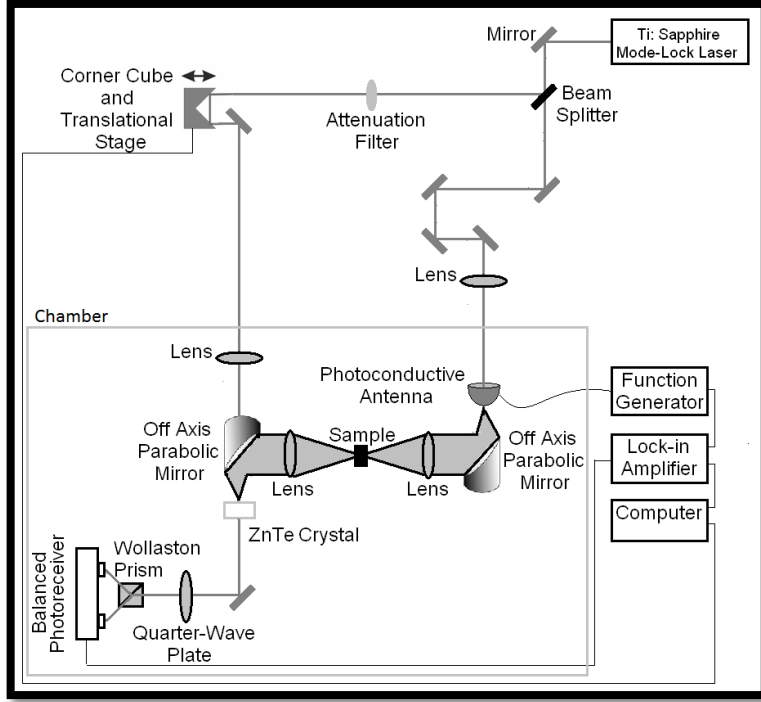
ile interdigital fotoiletken antene odaklanmaktadır. Anten yapısının ana kısımları silikon lens, GaAs yarı-iletken alttas ve tutucudur. Fonksiyon jeneratörüne bağlı olan anten 1kHz'de  $\pm 10V$  kare dalga ile modüle edilmektedir. Üzerinde altın elektrotlar bulunduran GaAs alttasın üzerine ışının düşmesi ile terahertz üretimi gerçekleşirken, silikon lens yardımı ile de odaktan geliyormuş gibi dağılımı sağlanmaktadır. Çipin ve lensin bulunduğu yüzeyler ve alttasın üzerinde bulunan elektrotların yakınlaştırılmış görüntüsü Şekil 3.3'de verilmiştir.



**Şekil 3.3.** (a) GaAs alt tas üzerinde bulunan altın elektrotlar (b) interdigital fotoiletken antenin çip ve lens olan yüzeylerinden görünümü

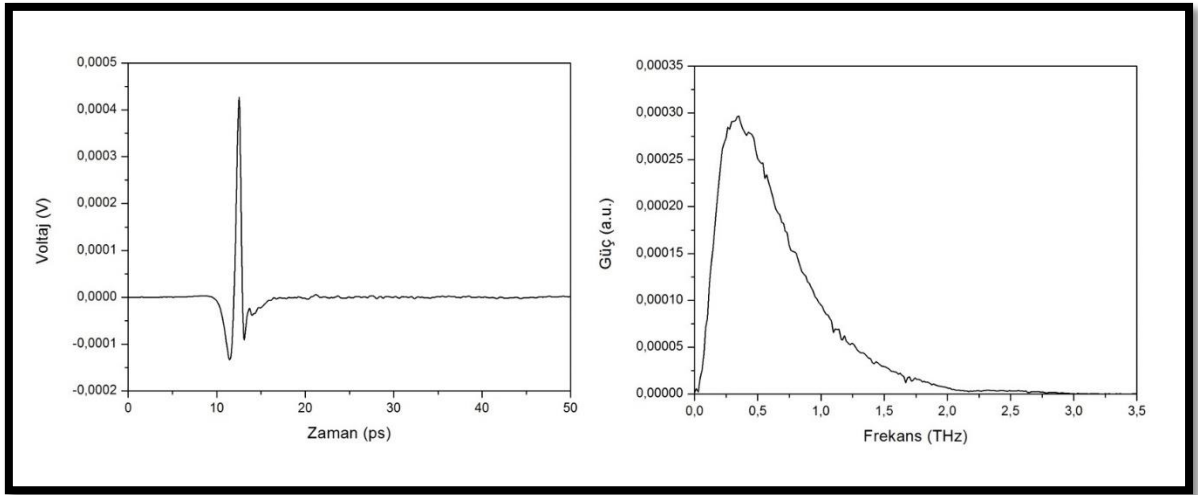
90° eksen-dışı parabolik aynanın odağında bulunan anten ile üretilen terahertz dalgası aynadan yansırken paralelleşir. Malzeme terahertz etkileşimini artırmak için paralel gelen terahertz dalgası lens (TPX lens,  $D = 50$  mm,  $F\#2$ ) ile örneğin üzerine odaklanmaktadır. Örnekten sonra aynı özelliklere sahip bir lens (TPX lens,  $D = 50$  mm,  $F\#2$ ) ile paralel haline geri getirilen terahertz dalgası, ikinci bir 90° eksen-dışı parabolik ayna ile ZnTe kristaline odaklanmaktadır. Algılama kolunda bulunan ilk optik, detektörde oluşabilecek satürasyonu önlemek amacı ile gücü düşürmek için kullanılan filtredir. Gücü detektör için uygun hale gelmiş olan ışın lineer hareket eden kızak üzerine yerleştirilmiş köşe aynadan geri dönecek şeklinde bir yansıma yaptıktan sonra, bir lens yardımı ile elektro-optik örnekleme yöntemi ile algılama yapılabilmesi için, ZnTe kristaline odaklanmaktadır. Kızak üzerinde bulunan bu aynanın ileri ve geri hareket kabiliyeti ile örnek içerisinden geçen terahertz dalga formu taranabilmektedir. Üretim ve algılama kollarının uzunluklarının eşit olması algılama yapılabilmesi için en önemli etmendir. Stage ile tarama gerçekleştirilirken kol uzunluklarının eşit olduğu noktada maksimum sinyal gözlemlenir ve kol uzunlukları arasında ki fark bu sinyali aralık dışında bırakarak sadece gürültü ölçülmesine neden olabilir. Algılama kristalinden sonra, polarizasyonun kontrolü için çeyrek dalga plakası kullanılmaktadır. Dalga plakasından sonra dairesel ya da eliptik olan polarizasyonu yatay ve düşey bileşenlerine ayırmak için ise Wollaston prizması kullanılmakta ve ikiye ayrılan ışın dengeli foto detektörün üzerine düşürülmektedir. Sistemin şeması Şekil 3.4'de verilmiştir. Tüm ölçümler sırasında veri

toplanması ve cihazların kontrolü bilgisayar yardımı ve Labview yazılımı ile gerçekleştirilmektedir.



**Şekil 3.4.** Kurulan sistemin şeması

Terahertz dalgası su emilimlerine çok hassas olması sebebiyle, ölçümlerin daha da iyileştirilmesi için sistem pleksiglas bir kutu ile kapatılmıştır. Kutu tasarlanırken üretimi sağlayan anten ile belirlemeyi sağlayan kristalin kutunun içerisinde kalmasına özen gösterilmiştir. Nem oranı %10 civarına düşene kadar nem alıcı cihaz ile hava basılmakta, daha sonra ise kuru azot basılarak %4'ün altında bir nem oranı elde edildikten sonra ölçüm gerçekleştirilmektedir. Bu sayede ölçümlerin gerçekleştiği frekans aralığında bulunan su emilimleri elenerek çok daha başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Şekil 4'te alınan referans ölçümlerinden biri verilmektedir. Nem oranı yüksek olan ortamlarda gerçekleşen ölçümlerden elde edilen güç spektrumlarında 0.56THz, 0.75THz, 0.99THz, 1.10THz, 1.16THz, 1.21THz ve 1.41THz'de su emilimleri görülmektedir ve Şekil 3.5'te verilen güç spektrumu bu emilimlerin herhangi birini içermemektedir. Bu da ölçümlerde ki hata oranımızı düşürmektedir.



**Şekil 3.5.** Terahertz sinyalinin zaman uzayında görüntüsü ve frekans uzayında güç spektrumu

İki lens arasına yerleştirilen örnekten THz ışını yaklaşık olarak 5mm çap ile odaklanarak geçmektedir ve Terahertz elektrik alanı örneğin içerisinde geçerken değişime uğramaktadır. Ölçümler alınırken ilk olarak örnek olmadan bir ölçüm gerçekleştirilir ve referans olarak kullanılır. Daha sonra örnek yerleştirilerek ölçüm alındıktan sonra bu ölçümler zaman ve frekans uzayında incelenir. Zaman uzayında toplanan verilerin hızlı Fourier dönüşümleri gerçekleştirildikten (FFT) sonra elde edilen faz ve güç bilgileri ile kırılma indisi ve soğurma katsayısı direk olarak elde edilmektedir. Bunun yanı sıra malzemenin dielektrik özellikleri de doğrudan yapılan ölçümlerden elde edilebilmektedir.

### 3.2. Zaman Çözünümlü Terahertz Spektroskopi Tekniğinin Geliştirilmesi

Atımlı terahertz spektrometre sistemleri ile malzemelerin incelenmesinde dinamik ölçüm yeteneğinin geliştirilmesi burada anlatılan çalışmanın ana amacıdır. “Pump/Probe” (pompa/sonda) diye adlandırılan bu dinamik ölçüm yeteneği genelde elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde elde edilen ultrahızlı atımlar sayesinde gerçekleştirilmektedir. Terahertz bölgesinde gerçekleştirmek için kaynak lazer hem görünür bölgedeki ultrahızlı 150fs altı malzeme fotouyarı (pompa) atımlarını üretmeli hem de terahertz bölgesindeki pikosaniye süreçli (sonda) atımlarını üretmelidir. Bu iki dalga boyu aralığını kapsayan lazerlerin darbe başına enerjisi yüksek olmalıdır ( $\mu\text{J}$ -mJ). Ülkemizde bu tip hem yüksek enerjiye sahip hem de 150fs altı darbe süreçleri olan lazer sistemleri sayıca oldukça azdır. Bu nedenle projede yapılacak bu ana çalışma Bilkent üniversitesi bünyesinde Ulusal Nanoteknoloji Merkezi (UNAM)’inde bulunan mJ enerji seviyeli yükseltilmiş kip-kilitli, 150fs altı atım süreçli Ti:Yakut lazer sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu dinamik terahertz ölçüm sistemin birçok bileşeni proje

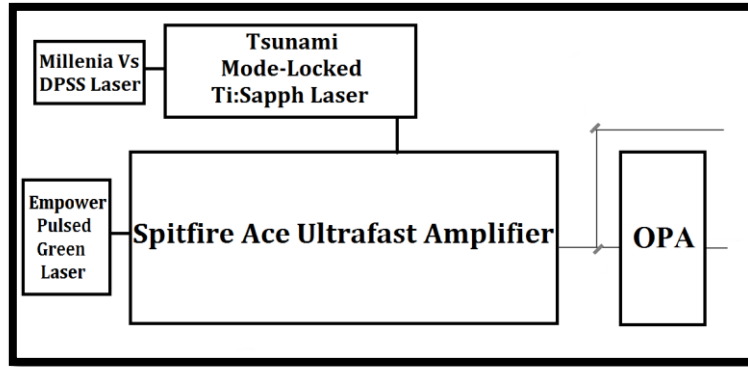
kapsamında satın alınarak UNAM'a götürölüp kuruldu. Yüksek tepe gücünden dolayı, özellikle bu enerji seviyelerine dayanıklı dielektrik kaplamalı aynalar, ışın çapını küçültmek için yüksek güçlere dayanıklı teleskopik mercek tasarımları için gerekli optik bileşenler, gibi özel optik bileşenler satın alınarak sistem geliştirildi. Ek olarak lazer kullanımı ve deneyler sırasında istenilen çevresel şartlar nedeniyle (sistem kutulanması ve ortam nemin giderilmesi) mevcut hava kurutma sistemi ile kurulan sistemin birleştirilmesi sağlandı. UNAM'da sistemi kurmadan önce ilk olarak bir optik tabla (optical breadboard) üzerinde sistemi ODTU'deki laboratuvarımızda kurup test ettik. Sistemi ilk baştan UNAM'da kurmamamızın bir başka sebebi oradaki yükseltilmiş lazer sisteminde kullanılan ve Pockel's cell diye adlandırdığımız elektro-optik modölator aygıtının sürücü devresinin proje başlangıcında arızalı olmasıdır. Proje süresince yükseltilmiş lazer sistemlerin THz pompa/sonda sistemlerinde kullanımı hakkında iyi bir deneyim edindik. Gerek UNAM'daki laboratuvar ortamının ısı ve toz kirliliği açısından yetersizliği gerekse yükseltilmiş lazerlerin su soğutma ünitesi veya elektronik sistemlerinden kaynaklanan sorunlar nedeniyle düşük performansı bu tip lazerlerin çizgisel olmayan yöntemlerle THz üretimi için iyi bir seçenek olmadığını ancak proje sonucunda anlayabildik. Aşağıda çizgisel olmayan (optik rektifikasyon) yöntemi sonucu üretilen THz darbeleri ile UNAM'da yaptığımız çalışmalar anlatılmaktadır. Sonuçlardan anlaşılacağı gibi yükseltilmiş lazer sistemin düşük performansı nedeniyle sinyal gürültü oranı spektroskopik ölçümlerde ODTU'deki sistemlerimiz kadar iyi olamadı. Proje boyunca lazerde yaşanan sıkıntılara rağmen pompa/sonda ölçümlerini gerçekleştirmek için sistemi yeni ve farklı yöntemler kullanarak optimize ettik. Sonuçta tek boyutta pompa/sonda ölçümlerini yarı-iletken numuneler üzerinden gerçekleştirdik.

UNAM'daki yükseltilmiş lazer sisteminin bir başka avantajı OPA (Optical parametric Amplification) diye adlandırılan dalga boyu dönüştürücü sistemidir. Birçok maddeyi incelemek için pompalama darbesinin dalga boyunun ayarlanabilmesi özel bir avantaj sağlamaktadır. Dinamik THz ölçüm sisteminin temelinde yükseltilmiş femtosaniye lazer kaynağından elde edilen atım enerjisinin bir kısmının çizgisel olmayan parametrik dönüştürücüye (OPA-Optical Parametric Amplification) verilir. Bu sistem ile dalga boyu ayarlanabilir bir pompalama darbesi sistemin bir koluna aktarılıp, OPA'ya gitmeyen enerji ise THz üretimi ve belirlenmesi için öbür kollarda kullanılır. Lazerde yaşanan olumsuzluklar proje boyunca OPA sistemini kullanmamızı engellemiştir. Bunun yerine yükseltilmiş lazerden gelen 800nm merkez dalga boyundaki atımı ve kendi kurduğumuz bir düzenek ile 1mm kalınlığındaki BBO (Barium Borate) kristali sonrası 400nm merkez dalga boyundaki atım ile pompa/THz sonda deneylerini gerçekleştirebildik. Bu iki pompalama dalga boyu artı THz ölçümlerindeki sinyal gürültü oranının yüksek olmaması pompa/sonda yapabileceğimiz örnek sayısını limitledi. Genel olarak sadece "bulk" denilen GaAs veya Silikon gibi yarı-iletken malzemelere bakabildik.

ODTU'de kurulan sistem ile UNAM'da kurulması istenilen sistem arasında sadece THz üretim tekniğinde farklılık vardır. ODTU'deki lazer sistemimiz nJ enerji seviyeli atımlara sahip olduğundan THz üretimi için özel GaAs yarı-iletken maddesine dayalı bir fotoiletken anten yapısı kullanılmıştır (FIA). UNAM'da ise 0.5mm kalınlığında <110> yönünde kesit yüzeyi olan özel bir ZnTe kristal kullanılmıştır. Bu tip kristallerden elde edilen THz ışınları fotoiletken antenlere göre daha hızlı olup, tayfları daha geniştir.

ODTÜ THz Araştırma Laboratuvarı'nda sistemin THz üretim ve belirleme kollarının kurulumu tamamlandıktan sonra optik tabla üzerinde bulunan tüm sistem UNAM'a taşınmıştır. İki kolun iyileştirilmesi tamamlandıktan sonra, pompa kolu olan üçüncü kolun kurulumu ve iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

UNAM'daki yükseltilmiş lazer sistemi: Tsunami marka bir osilatör ile pompalanan Spitfire marka güçlendirilmiş lazer 800nm dalgaboyunda, yaklaşık olarak 150fs atım uzunluğunda, 1kHz tekrarlama hızında ve 3W ortalama güce sahiptir. Bu lazerden çıkan ışın ikiye bölünerek biri sistem dışına alınırken diğer ışın OPA'nın içerisine girmektedir. Bu lazer sisteminin şeması Şekil 3.6'da verilmiştir.

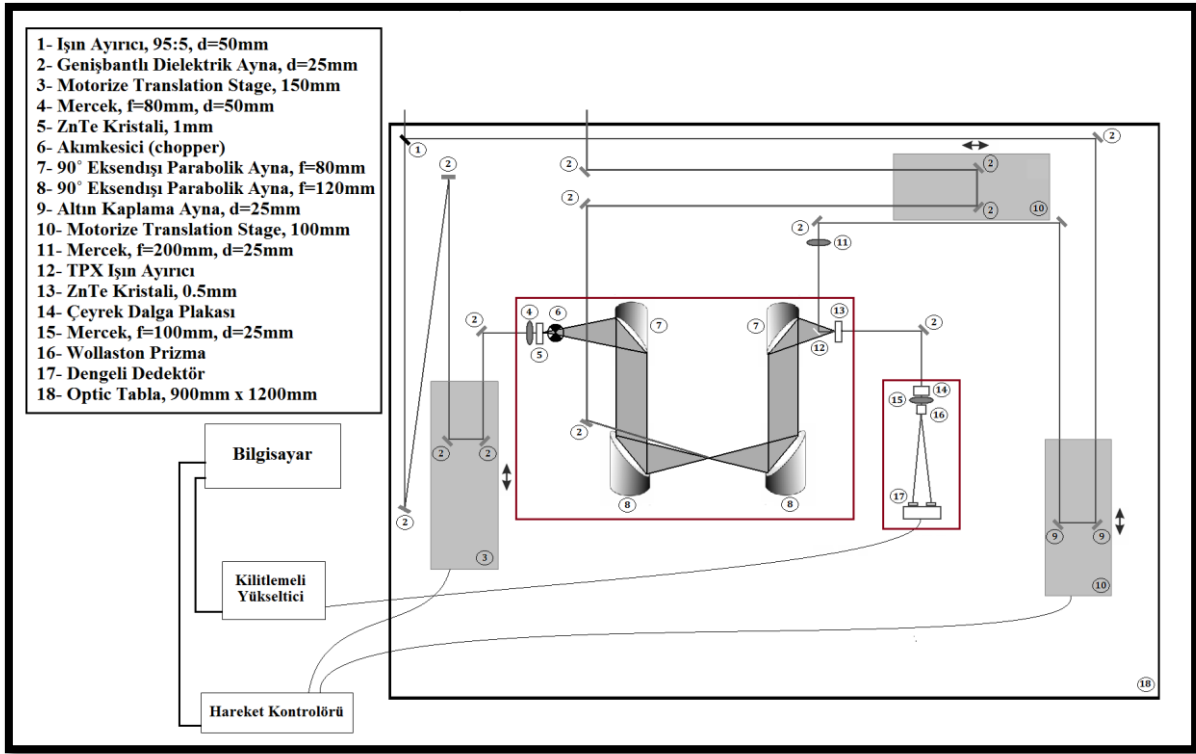


**Şekil 3.6.** Zaman çözünümlü terahertz spektroskopi sistemi için kaynak olarak kullanılan lazer sistemi

Sistemin şeması ve parçaların ayrıntıları Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Güçlendirilmiş lazerden gelen 800nm merkez dalga boyundaki ışın 95:5 oranındaki bir ışın ayırıcı ile ikiye ayrılır. Yüksek güç oranına sahip, geçiş yapan ışın üretim kolunu başlatırken, düşük güce sahip yansıma yapan ışın ise belirleme kolunu başlatır. Üretim kolunun gerekli uzunluğa ulaşması için iki adet yüksek enerji için uygun, genişbantlı dielektrik ayna ile ilave yol eklenmesinden sonra ışın, 150mm tarama kabiliyeti olan motorize lineer kızak üzerine yerleştirilmiş aynalar yardımı ile sistemin terahertz sinyali tarayabilmesini sağlamaktadır. Hareket eden kızak

üzerinden dönüşünü sağlayan ışın bir mercekle terahertz üretimini gerçekleştiren ZnTe kristaline odaklanır. Bu kristalin kalınlığı 0.5mm'dir. Kristal ile gerçekleştirilen terahertz üretiminde kristalin kalınlığı güç spektrumu ile ters, sinyal büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Kristalden sonra sinyali modüle etme amaçlı olarak bir optik kesici ("optical chopper") kullanılmıştır. Sistemde odakları 80mm ve 120mm olan iki farklı çeşit, dört adet 90 derece yansıtan parabolik ayna kullanılmıştır. 80mm odağa sahip ilk parabolik ayna optik kesiciden sonra sisteme yerleştirilmiştir ve kristal, aynanın odağına yerleştirilmiştir. Aynanın odağından gelen terahertz dalgası paralel olduktan sonra 120mm odaklı diğer parabolik aynaya ulaşır. Paralel gelen ışını 120mm'ye odaklayan aynadan sonra, aynı özelliklere sahip parabolik ayna kullanılarak örneğin yerleştirileceği odak noktası oluşturulmuştur. Üçüncü parabolik aynadan sonra tekrar 80mm odaklı parabolik ayna ile terahertz dalgası belirleme için kullanılan benzer bir ZnTe kristaline odaklanmıştır.

Belirleme kolunda bulunan 100mm hareket kabiliyetine sahip lineer kızak yerleştirilirken üretim kolunun uzunluğu göz önünde bulundurulmuş ve gerekli yerlerde ışığı döndürmek için, düşük enerji için uygun olan altın kaplama aynalar kullanılmıştır. Stage üzerinden dönen ışın bir mercekle yardımı ile ZnTe kristaline odaklanmaktadır. Dördüncü parabolik aynanın hizasında duran kristale ışını döndürerek ulaştırmak için ise terahertz bölgesinde geçirgen olan TPX ışın ayırıcı kullanılmıştır. ZnTe kristalinde belirleme ışını ile terahertz dalgası aynı noktada kesişmektedir. Kristalden sonra polarizasyon için çeyrek dalga plakası ve ışının detektöre odaklanması için lens kullanılmıştır. Wallaston prizma ile x ve y bileşenlerine ayrılan ışın daha sonra dengeli foto detektöre düşmektedir.



**Şekil 3.7.** Zaman çözünümlü sistemin tasarımı

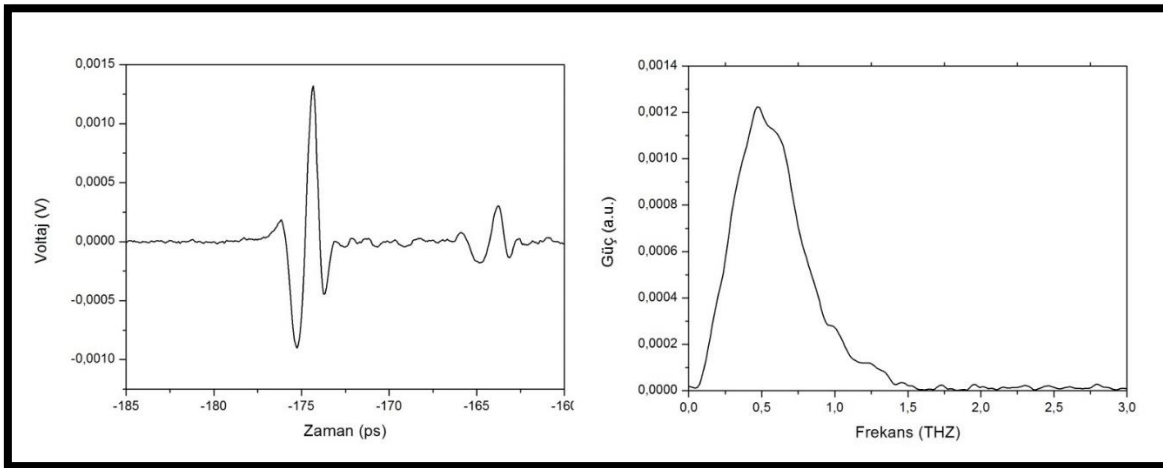
Pompa kolunun tasarımını gerçekleştirilirken iki kolun uzunluğun (pompa kolu ve odak noktasına kadar gelen THz üretim kolu) eşit olmasına özen gösterilmiştir. Pompa ve üretim kollarının lazerin çıkışından ayrıldığı nokta ile örneğin bulunduğu noktaya kadar ışınların takip ettiği yollar eşit olacak şekilde pompa kolundaki lineer hareket eden kızak ve aynalar yerleştirilmiştir. Pompa kolunun lazerden doğrudan (OPA'yı atlayarak) gelen ışın ile sisteme dâhil edilmesi 800 nm ve 400 nm'de optik pompa yapma kabiliyetini sisteme kazandırmıştır. Güçlendirilmiş lazerin ışın parametrelerinde (puls uzunluğu, güç veya sapması) gerçekleşen ufak bir değişim, OPA'nın tamamen değişmesine yol açabilmektedir. OPA bu etkenlerden dolayı proje süresince çalıştırılmadı ve bundan dolayı BBO kristali kullanarak ikinci harmonik üretim metodu kullanarak 800 nm den 400 nm'ye geçilebildi ve iki farklı pompa dalga boyunda pompa/sonda kabiliyeti kazanıldı. OPA çalışsaydı, istenilen dalga boyundaki ışın seçildikten sonra OPA'dan çıkan ışın, yüksek enerjiye uygun geniş bantlı dielektrik aynalar yardımı ile sisteme sokulacaktı. Daha önce de bahsedilen üretim kolunun örneğe kadar olan uzunluğu göz önünde bulundurularak yerleştirilen 100mm hareket kabiliyeti olan lineer kızak üzerine köşe aynalardan dönen ışın odak önünde duran ve THz darbesini örnek üzerine odaklayan parabolik aynayı teğet geçecek şekilde örneğin üzerine düşürüldü.





**Şekil 3.8.** Zaman çözünümlü sistem ve lazer sistemi

Sistemin tüm kurulumu tamamlandıktan sonra ölçümlerin iyileştirilmesi için kristal ile terahertz üretiminden, kristal ile belirlenmesine kadar olan kısım pleksiglas bir kutu ile kapatıldı ve bu kutuya bağlanacak kurutma sistemi özel bir tasarım sonrası gerçekleştirildi. Bu kutunun içine kuru hava basılarak genelde %30-%50 arasında olabilen nem oranı kolaylıkla %4,8'e kadar düşürülmüştür ve ölçümlerin sinyal gürültü oranlarının bu değişime bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra ortamın ışığından detektörün minimum etkilenmesi için ise siyah bir kutu hazırlanarak detektör ve önünde bulunan optikler, ışık almayacak şekilde örtülmüştür. Sistemin laboratuvar içerisinde ki pozisyonu iki farklı açıdan Şekil 3.8'de verilmiştir.



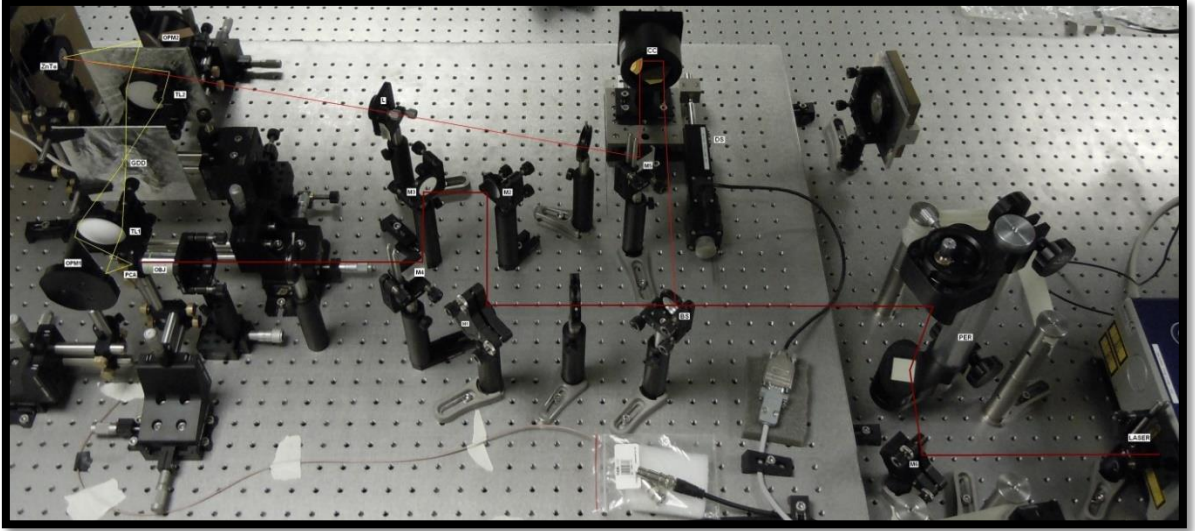
**Şekil 3.9.** Zaman çözünümlü terahertz spektroskop sistemi ile alınmış en iyi örnek ölçümün zaman ve frekans uzayında ki görüntüsü

Sistemin tüm iyileştirmeleri tamamlandıktan sonra alınan en iyi ölçüm Şekil 9'da verilmiştir. Bu sistem her bir kolunda hareket kabiliyetine sahip olduğu için diğer sistemlere göre çok daha

dinamik (yani fotouyarı sonrası değişen bir durumu gözlemleyebilmek) ölçümler gerçekleştirebilmektedir. Bunun yanı sıra, Türkiye’de başka bir benzeri olmayan ve dünyada ise az sayıda benzeri olan bir sistemdir. Bu yüzden ölçülen her örnek yayın potansiyeli taşıırken, malzeme bilimleri, biyoloji, vb. birçok disiplinin ortak çalışmalarına ön ayak olmaktadır. Bu raporun 4. kısmında sistem ile alınan pompa/sonda ölçümleri anlatılacaktır.

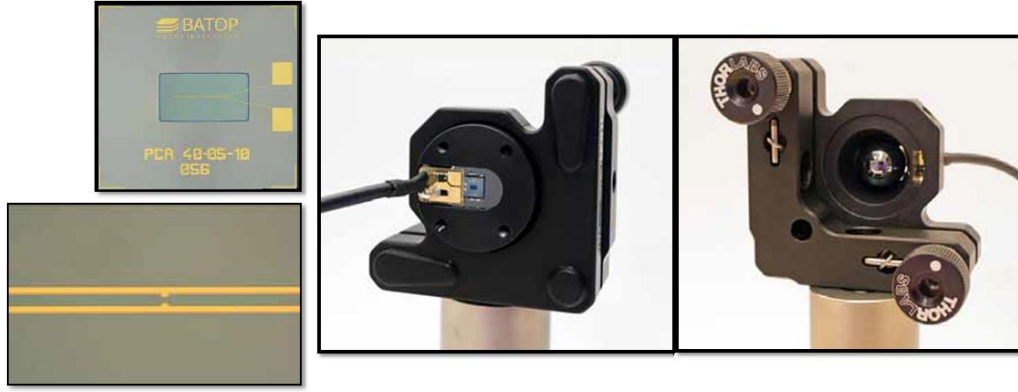
### **3.3. Zamana Dayalı Terahertz Görüntüleme Tekniğin Geliştirilmesi**

Ti:Yakut lazer pompalı THz ölçüm sistemlerin dezavantajı lazerdeki performanstır. Bu lazerlerin kip-kilitlenmesi çevresel şartlardan oldukça etkilenmektedir. Örneğin laboratuvar ortamındaki 1-2 derece ısısal değişimler veya lazer ışın yolu içerisindeki tozların ışın içerisinde geçişi lazer performansını etkileyebilir hatta kip-kilitlenmesini bozarak pulslu durumdan sürekli ışınlayan bir lazer sistemine çevirebilir. Bu durumda yukarıda anlatılan yöntemler kullanarak THz atım üretimi gerçekleştirilemez. Genelde bir örnek ölçümü dakikalar mertebesinde gerçekleştiği için lazerdeki performans sıkıntıları ciddi olmadığı sürece ölçümleri etkilemez. Yalnız bir örneğin her noktasından ölçüm almak istiyorsanız o zaman lazerin o süreç içinde kararlı olması gerekmektedir. Örneğin bir 25 x 25mm cismin görüntülenmesi demek neredeyse 200 adet ölçüm alınması demektir, bu da toplam ölçüm süresini saat mertebelerine çekmektedir. Bu süre içinde lazerin kararlı olmasını istiyorsanız Ti:Yakut yerine daha farklı lazer sistemlerini kullanmanız gerekmektedir. Toz ve ısısal değişimlerden fazla etkilenmeyen bir lazer türü kip-kilitli fiber lazerlerdir. ODTÜ Fizik Bölümü Terahertz Araştırma Laboratuvarı’nda kurulumu gerçekleşen zamana dayalı görüntüleme sistemi için kaynak kip-kilitli Er katkılı fiber lazer kullanılmıştır. <100mW ortalama güç, 90MHz tekrarlama frekansı ve 150fs atım süresi olan bu lazer ve kurulan zamana dayalı THz ölçüm sistemi Şekil 3.10’da gösterilmektedir. Bu lazerin bir avantajı çift renkte puls üretebilmesidir. İlk olarak 775nm merkez dalga boyundaki çıkışı kullanarak zamana dayalı THz ölçüm sistemi kuruldu. Sonrasında 1550nm’de çalışan özel fotoiletken anten yapıları kullanılarak görüntüleme sistemi geliştirildi.



**Şekil 3.10.** Çift dalga-boylu Er: katkılı kip-kilitli fiber lazer beslemeli zamana dayalı terahertz ölçüm sistemi

Sistemde lazerden gelen ışın bir periskop yardımı ile yükseltilerek sisteme sokulmaktadır. 90:10 oranlı bir ışın ayırıcı ile ikiye ayrılan demetler sistemin üretim ve belirleme kollarına yönlendirilir. Üretim için yüksek, algılama için ise düşük güç gerekli olduğu için ışın ayırıcıdan geçen ışın üretim koluna verilirken, yansıyan ışın belirleme koluna verilmektedir. Üretim kolunda dört adet ayna kullanılarak oluşturulmuş bir ekstra yol bulunmaktadır. Bu yolun uzunluğu iki kol arasında ki mesafenin eşit olmasını sağlayacak şekilde hesaplanmış ve buna göre aynalar yerleştirilmiştir. Işın 20x bir objektif yardımı ile dipol yapısındaki fotoiletken antene odaklanmaktadır. Anten yapısının ana kısımları silikon lens, yarı-iletken GaAs alt tas ve tutucudur. Fonksiyon jeneratörüne bağlı olan anten 1kHz'de pikten pike 20V kare dalga ile modüle edilmektedir. Üzerinde altın iki elektrot bulunduran GaAs alttasın üzerine ışının düşmesi ile terahertz üretimi gerçekleşirken, silikon lens yardımı ile de odaktan geliyormuş gibi dağılımı sağlanmaktadır. Işın, antenin üzerine düşürülürken elektrotlar arasında bulunan aralığın genişliği olan  $5\mu\text{m}$  kadar bir çap ile elektrotlar arasına düşecek şekilde odaklanmaktadır. Anten tabakasının ve lensin bulunduğu yüzeyler ve üzerinde bulunan elektrotların yakınlaştırılmış görüntüsü Şekil 3.11'de verilmiştir.  $90^\circ$  yansıtan parabolik aynanın odağında bulunan anten ile üretilen terahertz dalgası aynadan yansırken paralel olarak iletilir. Küçük örnekleri inceleyebilmek için paralel gelen terahertz dalgası lens (Teflon lens,  $D=50\text{ mm}$ ,  $F\# = 2$ ) ile örneğin üzerine odaklanmaktadır.

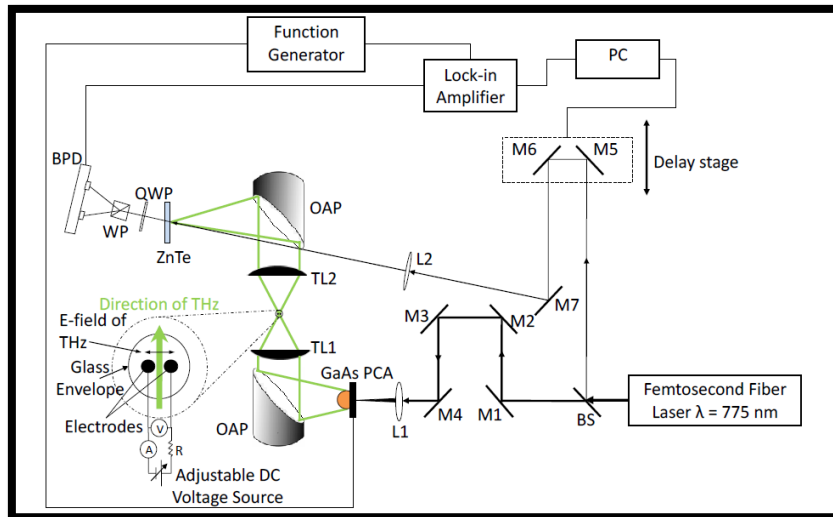


(a)

(b)

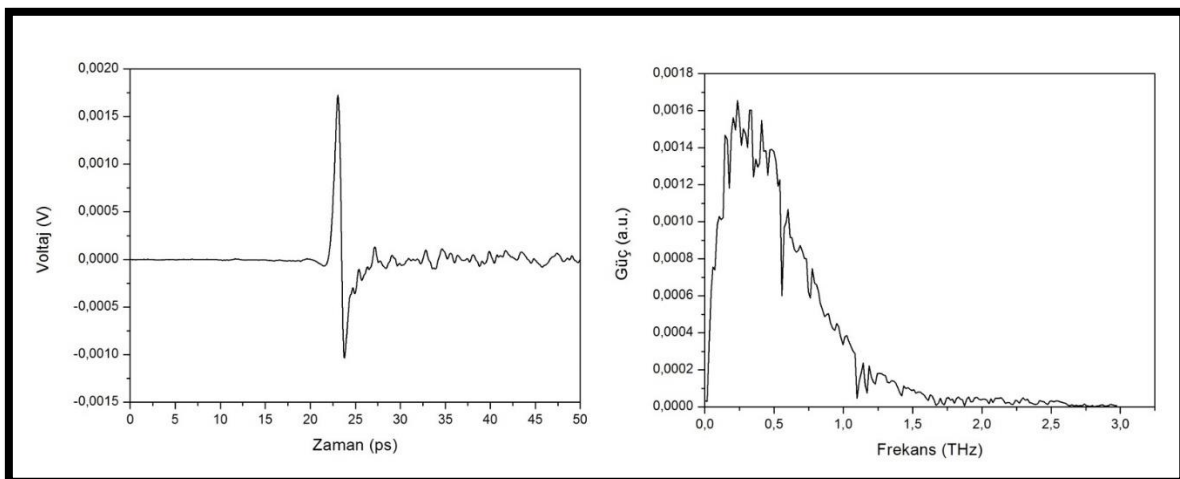
**Şekil 3.11.** (a) GaAs çip üzerinde bulunan altın elektrotlar ve elektrotlar arası aralık (b) dipol fotoiletken antenin çip ve lens olan yüzeylerinden görünümü

Örnekten sonra aynı özelliklere sahip bir lens (Teflon lens,  $D=50$  mm,  $F\#=2$ ) ile paralel haline geri getirilen terahertz dalgası, ikinci bir  $90^\circ$  yansıtan parabolik ayna ile 2mm kalınlığındaki ZnTe kristaline odaklanmaktadır. Lensler yerleştirilirken odakta minimum aberasyon elde etmek için kavisli kısımları dışa dönük şekilde yerleştirilmiştir. Belirleme kolunda ışın hareket eden lineer kızak üzerine yerleştirilmiş ve köşe aynadan geri dönecek şekilde bir yansıma yaptıktan sonra, bir lens yardımı ile elektro-optik örnekleme yöntemi ile algılama yapılabilmesi için, ZnTe kristaline odaklandırılmıştır. Lineer kızak üzerinde bulunan bu aynanın ileri ve geri hareket kabiliyeti ile örnek içerisinden geçen terahertz dalga şekli çıkartılabilmektedir. Algılama kristalinden sonra, polarizasyonun kontrolü için tekrar bir çeyrek dalga plakası kullanılmaktadır. Dalga plakasından sonra dairesel ya da eliptik olan polarizasyonu yatay ve düşey bileşenlerine ayırmak için ise Wollaston prizması kullanılmakta ve ikiye ayrılan ışın dengeli foto detektörün üzerine düşürülmektedir. Sistemin şeması Şekil 3.12’de verilmiştir. Tüm ölçümler sırasında veri toplanması ve cihazların kontrolü bilgisayar yardımı ve kendi yazdığımız Labview yazılımı ile gerçekleştirilmektedir.



**Şekil 3.12.** Sistemin şeması

Alınan bir örnek THz ölçümü Şekil 3.13'te verilmiştir.

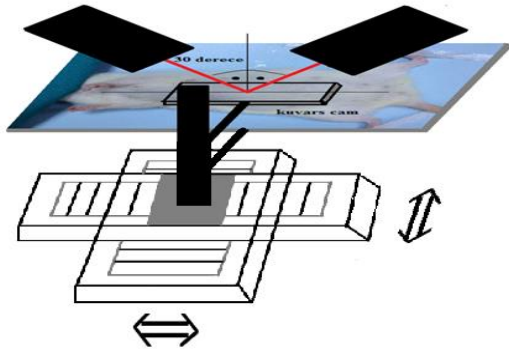


**Şekil 3.13.** Terahertz sinyalinin zaman uzayında görüntüsü ve frekans uzayında güç spektrumu. Güç spektrumunda görülen soğurmaların bir kısmı su emilimleridir. Sistemin kutulanıp azot ya da kuru hava kullanılarak kurutulması durumunda bu keskin soğurmalar ortadan kalkacak ve sinyal gürültü oranı çok daha artacaktır.

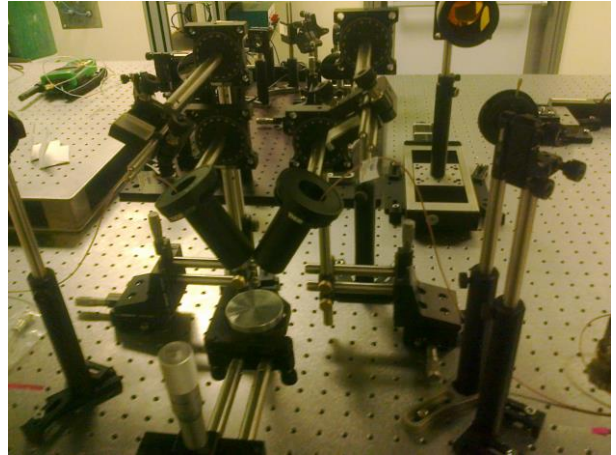
Geliştirilen sistem ile görüntüleme yapabilmek için örneklerin THz odak etrafında 3-boyutta hareket ettirilmesi gerekmektedir. Burada şu adımlar izlenmelidir:

- THz darbe görüntüleme sistemi THz yansıma verilerinden görüntü oluşturur.
- THz sinyalleri değişken bir optik gecikme hattı kullanılarak üretim ve belirleme darbeleri arasındaki göreceli zaman gecikmesi değiştirilerek örneklenir.
- Görüntünün uzamsal haritalanması örnek ve THz ışınının taranması ile gerçekleşir.

- Her pikselin tam THz darbe bilgileri toplanır.

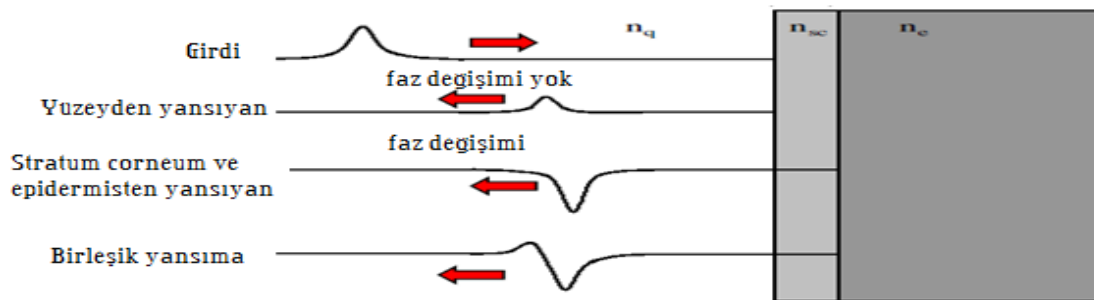


**Şekil 3.14a.** Örneğin görüntüleme sistemine yerleştirilmesi ve 3B hareketi sağlayan kızaklar



**Şekil 3.14b.** Kurulan sistem. THz Tx ve Rx kolları odağında örnek yere paralel olarak konumlandırıldıktan sonra 3B hareket ettirilerek görüntü elde edilebilir

Görüntüleri alınacak örnekler sistem odağına yerleştirildikten sonra (bkz. Şekil 3.14a) sonra THz atımların örnek içinden geçişi ve yansıması sonucu görüntüler elde edilir. Örneklerin optik özellikleri sistemde örnek olduğu ve olmadığı zamanlarda sinyaller arasındaki genlik ve faz farkları kullanılarak elde edilir. THz darbesindeki değişiklikler ışının hangi maddede yayıldığı ve yansıtıldığına bağlıdır. Elde edilen THz darbesi örnek olmadan edinilen referans THz darbesine (düz yatay aynadan yansıyan bkz. Şekil 3.14b) göre genişler ve gecikir. Aşağıda katmanlı bir yapıdan beklenen yansımalarının ve THz darbe profilinde oluşan farklılıklar gösterilmektedir (Şekil 3.15).



**Şekil 3.15.** İki katmanlı yapıdan yansıyan THz darbelerin olası beklenen profilleri

Yukarıdaki şekilde üst katmanın kuvarstan daha düşük bir kırılma indisine( $n$ ) sahip olması THz ışınının bu yüzeyden yansıması sonucunda faz değişimine neden olmaz. Fakat THz darbesi yüksek bir kırılma indisine sahip bir ortama girdiğinde faz değişimi olur ve böylece



kırıcılık indisinde değişime neden olan derinin özellikleri fazda meydana gelen değişiklikler sayesinde ortaya çıkar. Proje kapsamında kurulan sistem ile ilk olarak biyolojik örneklerin (yumuşak (deri) ve diş (sert)) görüntüleri elde edilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen ölçüm sistemindeki çalışmalar devam etmektedir.

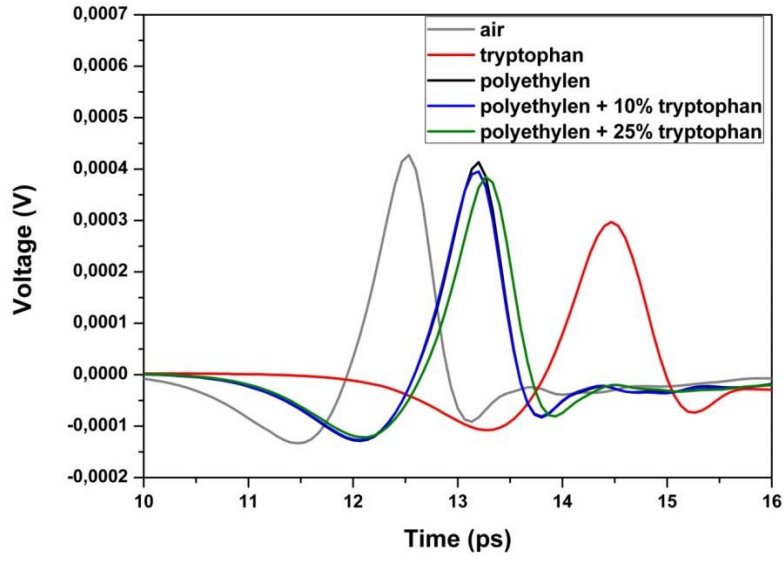
#### **4. BULGULAR ve TARTIşMA**

##### **4.1. Zamana Dayalı Terahertz Spektroskopi Sistemi- Biyoloji Araştırmaları**

###### **4.1.1. Triptofan Ölçümleri:**

Triptofan canlı organizmalar için büyük önem taşıyan bir aminoasittir. Stres tepkileri, uyku, ruhsal durum, iştah gibi durumların düzenleyicisi olan serotonin hormonunun öncülüdür. Bunun yanı sıra, son yapılan çalışmalar göstermektedir ki hematolojik ur gelişmesi, yetişkin T-hücresi lösemisi, gastrointestinal kanser, kolon kanseri, vb. kötü huylu hastalıklar ile triptofan yıkımı artmaktadır. Buradan yola çıkılarak triptofan konsantrasyonundaki değişimin bir tanı metodu olarak kullanılabileceği düşünölebilir.

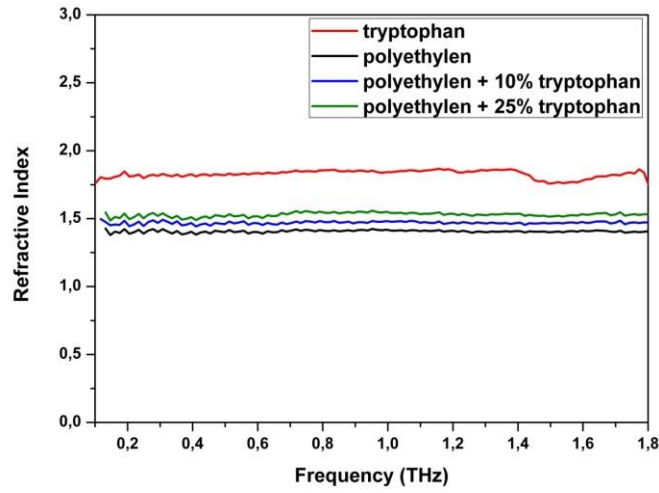
ODTÜ THz Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan zamana dayalı THz spektroskopi sistemi ile gerçekleştirilecek ölçümler için özel örnekler hazırlanmıştır. Örnekler L-triptofan ve spektrofotometrik sınıf yüksek çözünürlüklü polietilen kullanılarak hazırlanmıştır. Kuru toz triptofan, katı parçacık boyutu dağılımını azaltmak için, bir akik havanda homojen hale getirilmiştir ve polietilen ile karıştırılmıştır. Ağırlıkları oranında %10 ve %25 triptofan içeren “pelletler” 10 dakika boyunca 1500 psi basınç uygulanarak hazırlanmıştır. Bu örneklerle ek olarak negatif ve pozitif kontroller için saf polietilen ve saf triptofan örnekleri de hazırlanmıştır.



**Şekil 4.1.1.** Triptofan karışımı örneklerin terahertz görüntüleri

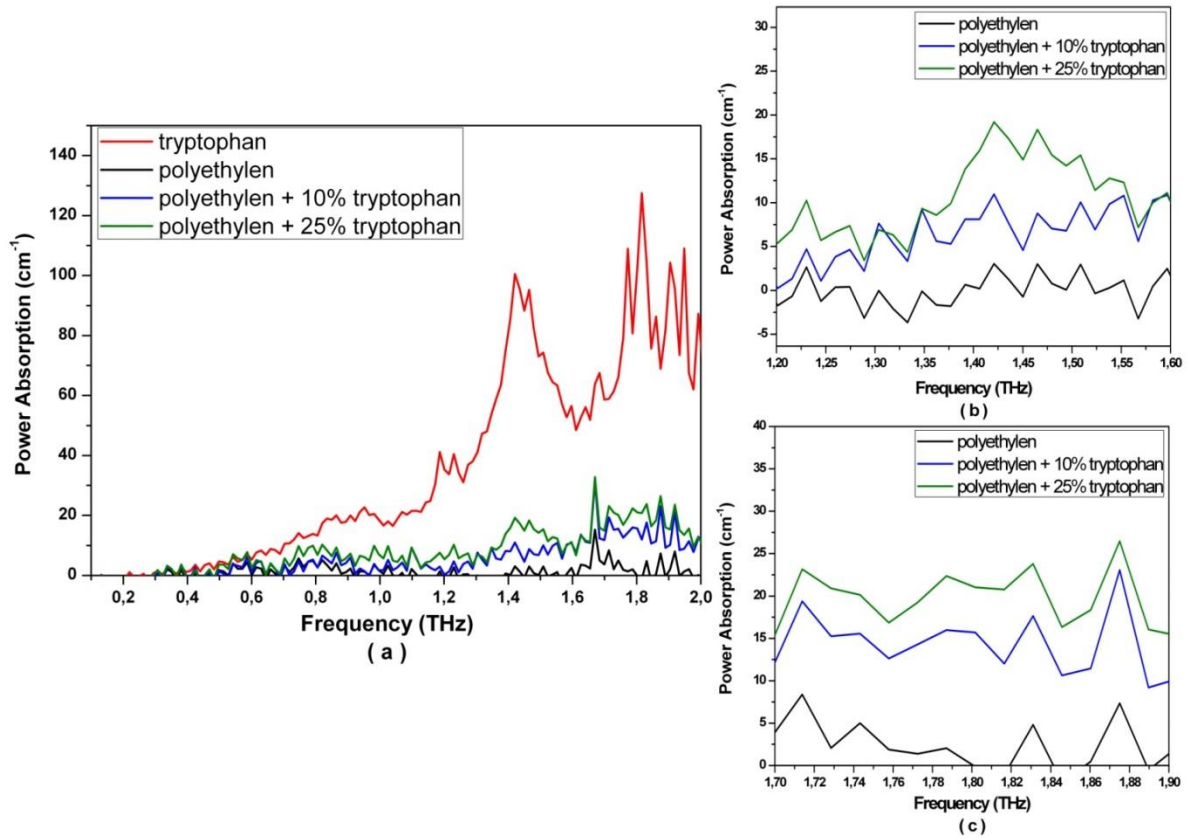
Şekil 4.1.1’de terahertz dalgasının örneklerden geçişi ile değişimi zaman uzayında verilmiştir. Zaman bölgesinde ki bu ölçümler incelenirken iki farklı değer göz önünde bulundurulmuştur; zaman ekseninde gerçekleşen kayma ve elektrik alan büyüklüğünde gerçekleşen düşüş. Hava ölçümü referans olarak alındığında artan triptofan miktarı ile doğru orantılı olarak bu iki değerde de artış gözlemlenmiştir. %10 triptofan miktarı, polietilen ile kıyaslandığında zaman ekseninde kayma gerçekleştirmek için yeterli olmamasına rağmen %25 triptofan miktarı polietilen ile kıyaslandığında göz ardı edilemez bir kayma gerçekleştiği görülmüştür. Fakat frekans uzayına geçildiğinde Şekil 4.1.2 ve 4.1.3’de görüldüğü gibi %10 triptofan içeren örnek ile saf polietilen arasında gözlemlenebilir bir fark mevcuttur. Şekil 2’de örneklerin kırılma indislerinin değişimi verilmiştir. Artan triptofan miktarı ile kırılma indislerinde de artış gözlemlenmiştir. Gerçekleşen artış miktarlarının konsantrasyonlar ile doğru orantılı olduğu, konak maddenin ve eklenen maddenin kırılma indisleri ve hacimsel konsantrasyonları arasındaki ilişkiyi doğrusal olarak veren CRI Model (complex refractive index-kompleks kırılma indisi) kullanılarak doğrulanmıştır. En düşük kırılma indisi polietilende, en yüksek ise triptofanda görülmüştür.





**Şekil 4.1.2.** Triptofan karışımı örneklerin kırılma indisleri

Triptofanın 0,1 ile 2THz frekans aralığında ki soğurma spektrumunda 1.42THz ve 1.82THz'de karakteristik pikleri gözlemlenmiş ve bu değerler literatür taraması yapılarak doğrulanmıştır. Şekil 4.1.3'de bu pik noktaları görülmektedir. %10 ve %25 triptofan içeren örnekler için yakından bakıldığında ise pik değerinde artış görülmüştür.



**Şekil 4.1.3.** Triptofan karışımı örneklerin soğurma katsayıları (a)0.1-2THz arası (b)1.2-1.6THz arası ve (c)1.7-1.9THz arası

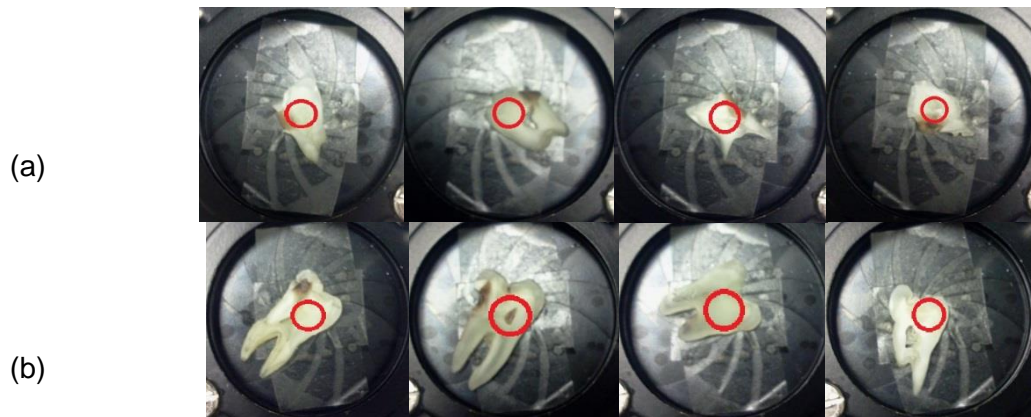
#### Açıklamalar:

- 1.42 THz'de görülen pik C11 ve C12 molekülleri arasında ki bükülme hareketine dayanırken,
- 1.82 THz'de görülen pik ise C1'den C9'a kadar olan halka bükülmesine dayanmaktadır.

ODTÜ Biyoloji bölümü ile ortaklaşa yürütülen bu çalışma, Applied Spectroscopy dergisinin Ocak 2014 (68(1)) sayısında "Concentration Based Measurement Studies of L-Tryptophan using THz-Time Domain Spectroscopy (THz-TDS)" başlığı ile basılmıştır [Ozer vd. 2014].

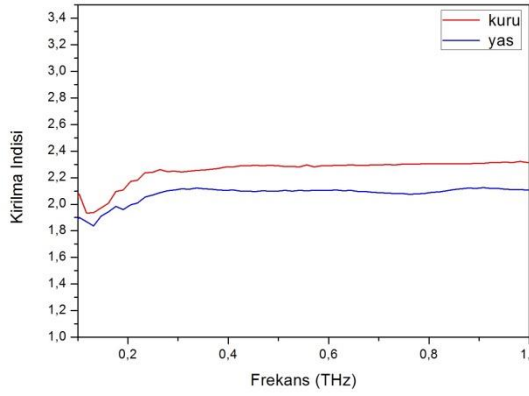
#### 4.1.2. Diş ölçümleri:

Ankara Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi ile ortak yürütülen bu çalışma kapsamında yeni çekilmiş süt ve yetişkin dişler temizlenip, saf suda muhafaza edildikten sonra ODTÜ'deki sistemler ile ölçümler gerçekleştirdik. Her bir diş, yavaş hızda çalışan su soğutmalı elmas testere ile kronun uzun eksenine paralel olacak şekilde dilimlere ayrılmıştır. Kurulumu ODTÜ THz Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleşmiş olan zamana dayalı THz spektroskopi sistemi ile dört adet (ikisi çürük, ikisi sağlıklı) süt, dört adet (ikisi çürük, ikisi sağlıklı) de yetişkin olmak üzere toplam sekiz adet diş örneğinin analizi gerçekleştirilmiştir. Bu örneklerin tutucu içerisindeki görünüşleri Şekil 4.1.4'te verilmiştir. Ölçümler sırasında terahertz dalgaları 5mm çaplı bir daire alanına odaklanarak örneklerden geçirilmiştir. Her bir diş ince dilimler haline getirilmesiyle terahertz dalgaları örneklerin katmanlı yapısını incelemek için kullanılabilmiştir. Diş örneklerinin kırılma indisleri ve soğurma katsayıları 0,1-1 THz aralığında yaş (çekildikten sonra) ve kuru (bir kaç gün kurutulduktan sonra) durumları için analiz edilmiştir.

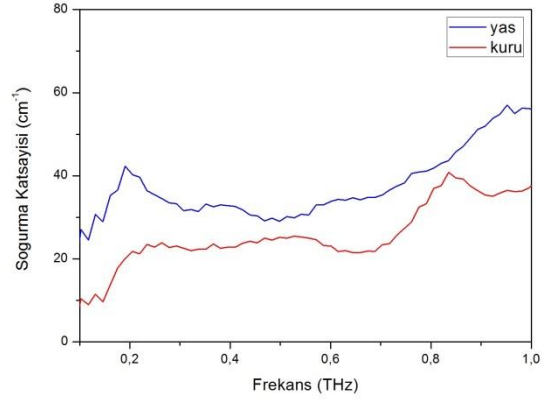


**Şekil 4.1.4.** (a)Süt dişi örnekleri (b) yetişkin dişi örnekleri

Saf su içinde muhafaza edilen diş örnekleri ölçüldükten sonra oda sıcaklığında kurutulduktan sonra ölçümler yeniden gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1.5'te kırılma indisleri ve soğurma katsayıları verilen yaş ve kuru örnekler arasında göz ardı edilemez bir fark gözlemlenmiştir. Yaş diş örneklerinin kırılma indislerinin kuru olanlara göre daha düşük ve soğurma katsayılarının ise kuru olanlara göre daha yüksek olduğu elde edilmiştir. Suyun kırılma indisi dişin kırılma indisinden düşük, soğurma katsayısı ise terahertz bölgesinde yüksek olduğu için diş ile etkileşmesi sonucunda örneğin kırılma indisinin düşmesi ve soğurma katsayısının artması beklenen bir sonuçtur. Çalışmanın devamında ağız içi ortamının ıslak olmasından dolayı yaş örnekler incelenmiştir.



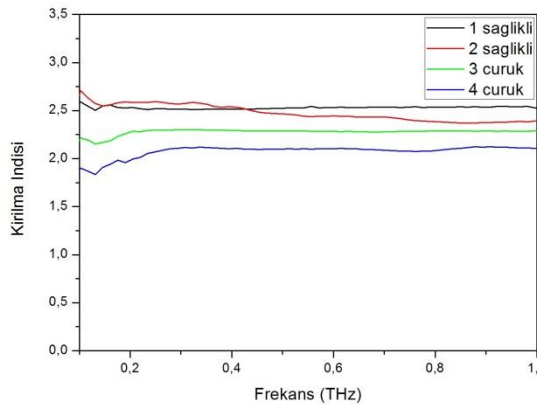
(a)



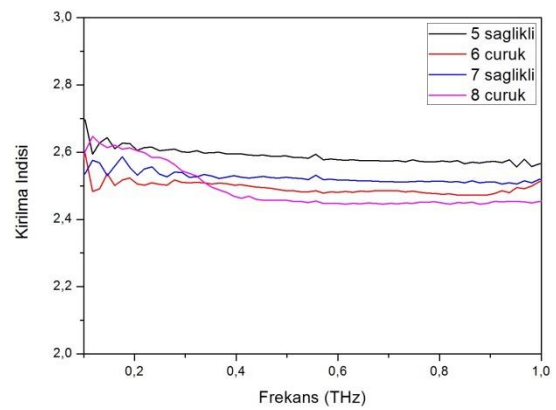
(b)

**Şekil 4.1.5.** Yaş ve kuru diş örneklerinin (a) kırılma indisleri (b) soğurma spektrumları

Şekil 4.1.6'da süt dişi ve yetişkin dişi örneklerinin kırılma indisleri verilmiştir. Her iki diş grubu için de çürük olan diş örneklerinin kırılma indislerinin sağlıklı örneklerle göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.



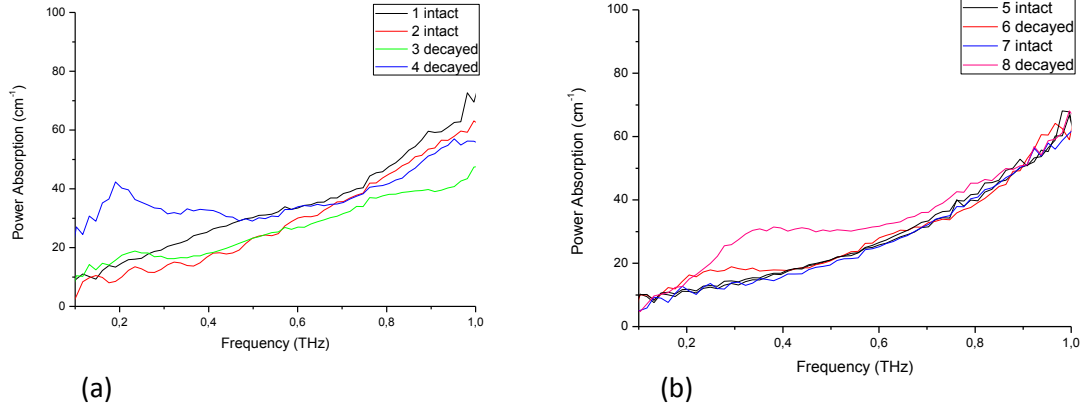
(a)



(b)

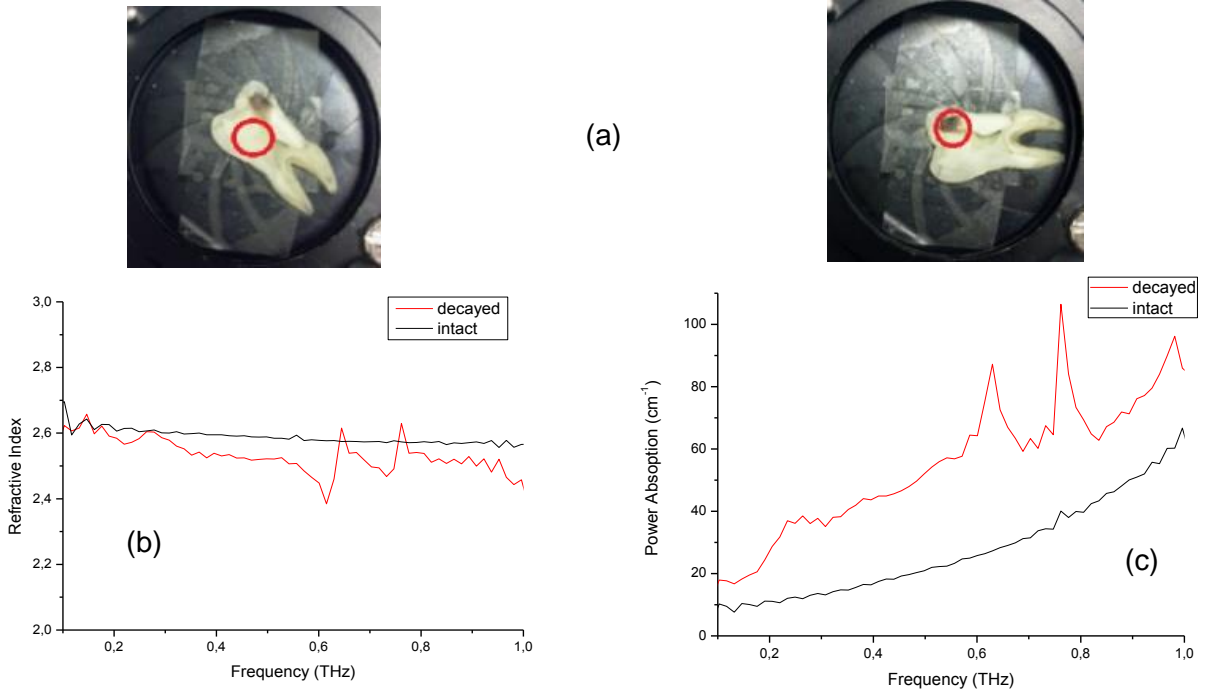
**Şekil 4.1.6.** Çürük ve sağlıklı (a) süt dişi (b) yetişkin dişi örneklerinin kırılma indisleri

Şekil 4.1.7’de süt dişi ve yetişkin dişi örneklerinin soğurma spektrumları verilmiştir. Her iki diş grubu için de çürük olan diş örneklerinin soğurma katsayılarının sağlıklı örneklerle göre 0,1-0.3THz arasında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.1.7.** Çürük ve sağlıklı (a) süt dişi (b) yetişkin dişi örneklerinin soğurma spektrumları

Şekil 4.1.8(a)’da görüldüğü gibi tek bir örneğin hem sağlıklı hem de çürük kısımları ölçülmüştür. Diğer ölçümlerde de gözlemediği gibi çürük kısmın kırılma indisi düşük, soğurma katsayısı ise yüksek çıkmıştır.

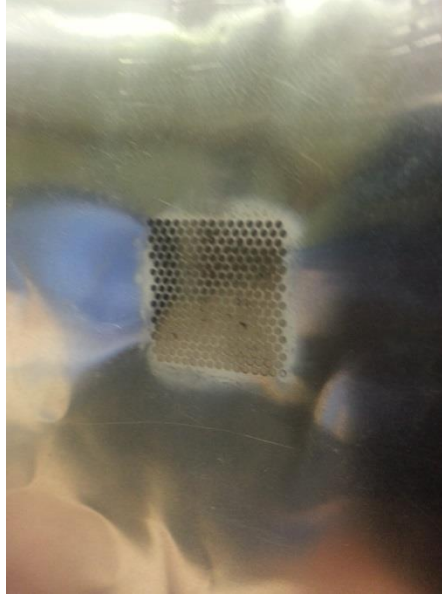


**Şekil 4.1.8.** Yetişkin bir diş örneğinin (a)ölçülen sağlıklı ve çürük kısımları,(b) kırılma indisleri (c) soğurma spektrumları

Terahertz bölgesinde incelendiğinde diş yapılarında ki bozulmaların sağlıklı diş ile yarattığı farklar tanı ve görüntüleme için yeni olanaklar sağlayacaktır. Bu çalışma, “Characterization of primary and adult teeth using terahertz spectroscopy: preliminary findings” başlığı ile “19th International Congress of the IADMFR, Bergen, Norway” de sunulmuştur.

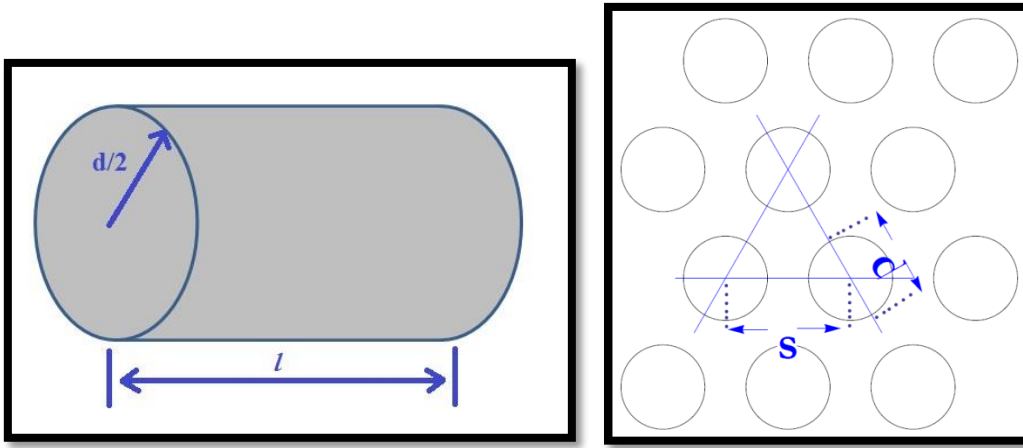
#### 4.2. Zamana Dayalı Terahertz Spektroskopi Sistemi- Dalga Kılavuzu (Izgara) Yapıları

Bu çalışma için geliştirilen ızgara yapılar sadece belli bir frekansın geçmesine izin veren dikroik filtrelerdir. Dikroik filtreler metal plakaların üzerine belli bir geometrik dizilime sahip olan yuvarlak, kare ya da üçgen deliklerden oluşmaktadır. Herbir delik dalga kılavuzu olarak davranmaktadır. Bu çalışma için tercih edilen geometrik dizilim üçgen iken, delik şekli için ise yuvarlak tercih edilmiştir. Şekil 4.2.1’de özel olarak üretilen filtrelerden biri gösterilmiştir.



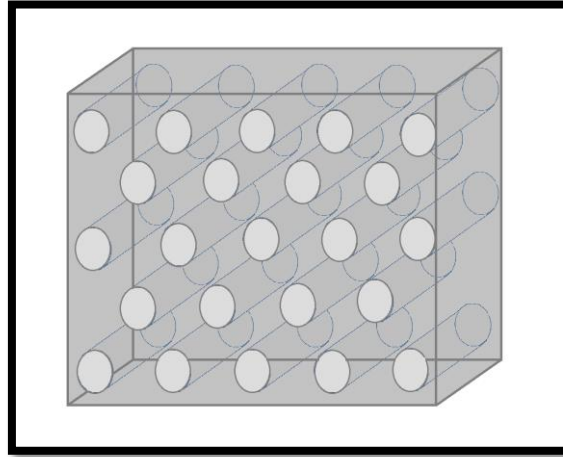
**Şekil 4.2.1.** Dikroik filtre (delikler dalga kılavuzu gibi davranarak sadece belli THz frekanslarını geçiriyor

Filtrenin geçişini engellemediği frekans aralığı deliklerin çapına, deliklerin birbirine uzaklığına ve plakanın kalınlığına bağlıdır. Durma frekansı altında ki frekanslar için filtre ayna gibi davranmaktadır. Filtrenin üzerindeki delikler, dairesel dalga kılavuzudur ve durdurma frekansının altındaki dalgaları karakteristik dalga kılavuzu uzunluğu boyunca sönmüldürür. Şekil 4.2.2’de bir adet deliğin yakından görünümü ve deliklerin birbirine göre pozisyonu verilmiştir.



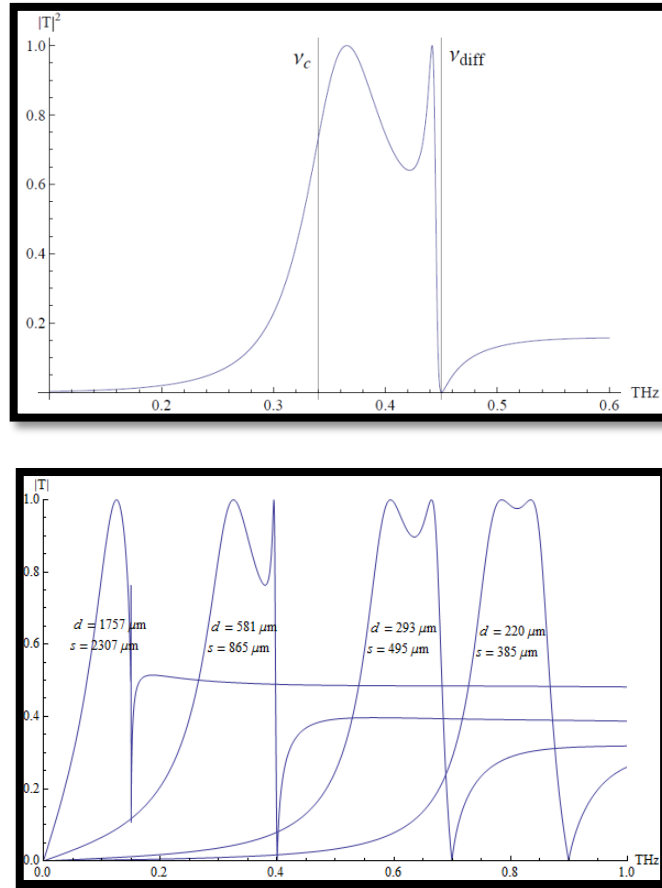
**Şekil 4.2.2.** Dikroik filtrede yer alan tek bir delik ve deliklerin birbirine göre pozisyonu

Bu şekilde görüldüğü üzere deliğin yarıçapı ( $d/2$ ) dairesel dalga kılavuzunun yarıçapını, plakanın kalınlığı ise dairesel dalga kılavuzunun uzunluğunu oluşturmaktadır.



**Şekil 4.2.3.** Dikroik filtrenin şematik gösterimi

Şekil 4.2.3'de verilen ölçeksiz dikroik filtre çizimi deliklerin 3 boyutta simetrisini gösterme amaçlı çizilmiştir. Her bir deliğin kendi içinde dairesel dalga kılavuzu olarak davranacağı daha net görülmektedir. Durdurma frekansının altında frekansa sahip olan dalgaların dalga kılavuzu boyunca sönümlenmektedir. Bu frekansın üzerinde ki frekansa sahip dalgalar geçişi sağlarken bir noktadan itibaren delikler birbirine çok yakın olduğu için difraksiyon gerçekleşmektedir. Bu filtrelerin üretilmesi için  $l, d$  ve  $s$ 'ye bağlı geçişi elde edebileceğimiz bir kod yazılara Mathematica ile hesaplanmıştır ve sönümlenmeyi, geçişi ve difraksiyonu da çıkan sonuçlar ile gözlemleyebilmekteyiz. Şekil 4.2.4'te yazılım ile elde edilen sonuçlarda sönümlenmenin ve difraksiyonun limitleri ve farklı  $s, d$  ve  $l$  değerleri için bu limitlerin değişimi gösterilmiştir.

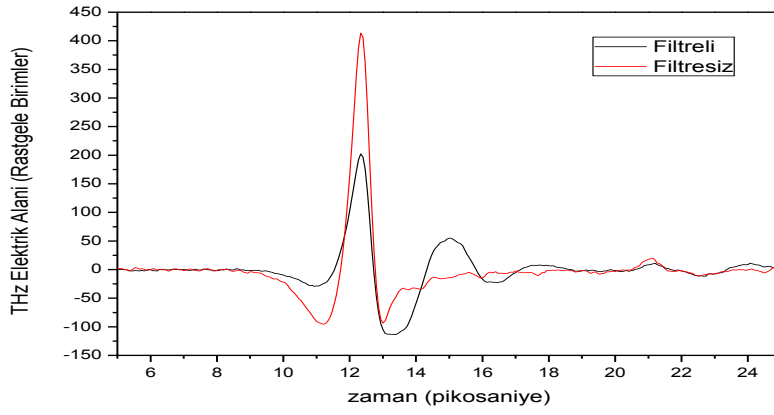


**Şekil 4.2.4.** s,d ve l parametreleri ile hesaplanan geçiş spektrumu

Ürettiğimiz filtre için  $v_c = 340$  GHz,  $v_{diff} = 450$  GHz olarak seçilmiştir. Bu frekans aralığı için gerekli olan delikler arası mesafe;  $s = 769\mu m$ , deliklerin çapı;  $d = 517\mu m$  olarak yazılımı ODTÜ THz Araştırma Laboratuvarı araştırma görevlisi tarafından Matematica ile yazılmış kod ile hesaplanmıştır. Delikli bölgenin boyutu  $1.1cm \times 1.1cm$ dir ve plaka kalınlığı  $l = 200\mu m$ dir. Filtre alüminyum plakadan lazer ile kesme yöntemiyle imal edilmistir. Üretici firma  $1064nm$  dalga boyunda,  $70ns$  puls atımı olan,  $70kHz$  tekrarlama oranı olan,  $25kW$  pik gücü olan Yb: katkılı fiber lazer (Fiberlast Nanomark 20W) kullanmaktadır. Lazerin odagında ki ışın çapı olan  $30\mu m$  istenilen geometrik fitre deseninin üretimi için yeterlidir.

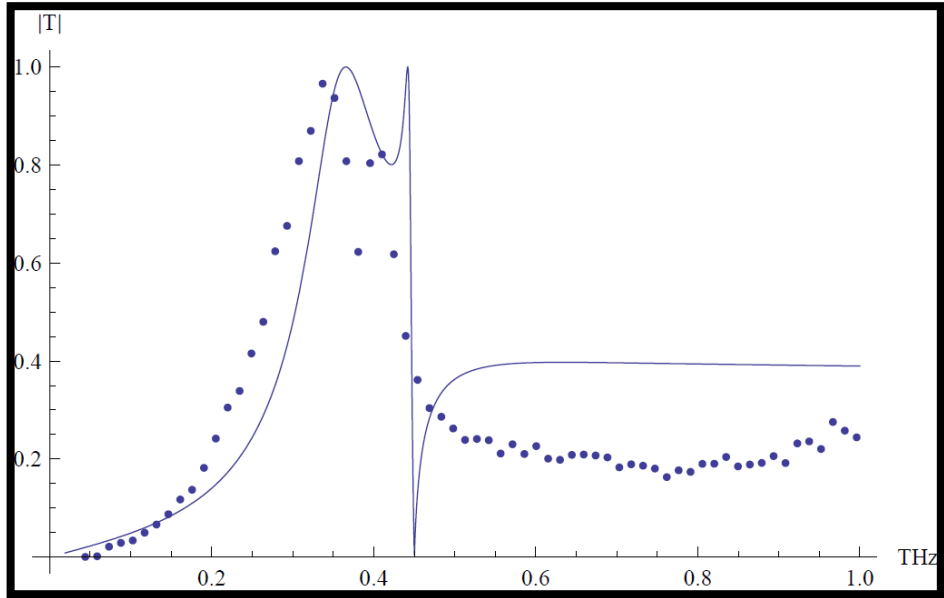
Üretilen filtrelerin ölçümleri ODTÜ THz Araştırma Laboratuvarında bulunan kaynak olarak  $15fs$  Ti: Safir kip-kilitli lazer kullanılan zamana dayalı terahertz spektroskop sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2.5'te terahertz sinyalinin filtre yokken ve filtre varken ki değişimi verilmiştir.





**Şekil 4.2.5.** Filtre varken ve yokken alınan terahertz taramaları

Şekil 4.2.6'da ise alınan ölçümün sonuçları ve Matematica ile elde edilmiş hesaplamaların sonuçları verilmiştir. Frekans vs. Geçiş grafiğine bakıldığında s, l ve d'ye bağlı olan sönümlenme, geçiş ve difraksiyon evreleri hesaplanan ve ölçülerek elde edilen her iki sonuç için de gözlemlenmiştir. Noktalı çizgi olan sonuçlar ölçümlerden elde edilirken, düz çizgi ile gösterilen sonuçlar yazılım ile hesaplanmış olanlardır. Yaklaşık olarak 0.35THz civarında sönümlenmenin gerçekleştiği görülmektedir. 0.45THz'e kadar geçiş sağlandıktan sonra difraksiyon gözlemlenmiştir. Eğer difraksiyon ile karşılaşılmıyaydı, geçiş aynı şekilde devam edecekti.



**Şekil 4.2.6.** Deneyisel verilerin hesaplanmış veriler ile karşılaştırılması



Bu filtrelerin en önemli özelliklerinden biri de üretim aşamasının zahmetsiz ve ucuza mal edilebilir olmasıdır. Basit bir kod yardımı ile parametreleri hesaplandıktan sonra markalama lazeri ile kısa sürede çok sayıda ve farklı özelliklerde filtreler üretilebilir. Yapılan bu çalışma sayesinde THz dalgaların geçişlerini frekansa göre filtreleyecek dalga kılavuz yapıları kolaylıkla tasarlanabilmektedir.

#### 4.3. Zamana Dayalı Terahertz Spektroskopi Sistemi-Plazma İşlenmiş Polipropilen

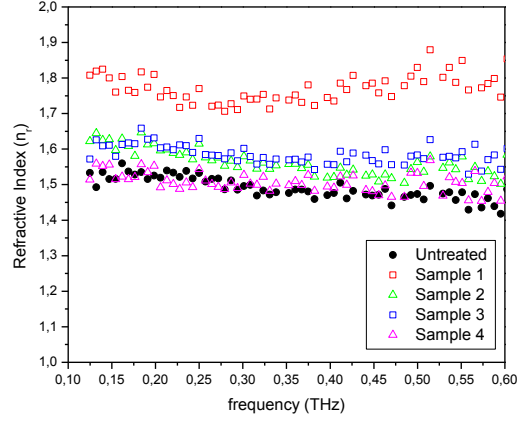
Maddenin dört halinden biri olan ve evrende var olan maddenin %99'unu oluşturduğu düşünülen plazma, günümüz bilim alanlarında yoğun ilgi ile araştırılmaktadır. Ülkemizde özellikle sanayi ve enerji ile ilgili alanlarda plazmaların uygulamaları üzerine çalışmalar sürdürülmektedir. Özellikle metal kaplama, yarı-iletken ve dielektrik kaplamalar için üretilen plazmaların yoğunluğu ve elektriksel özelliklerin belirlenebilmesi çok önemlidir. Polipropilen sanayide yaygın olarak kullanılan plastik türlerinden biridir. Son zamanlarda plazma ortamında bu tür malzemeleri düşük sıcaklıklarda işleyerek malzemenin yapısal parametrelerinde iyileştirme yapılabileceği gözlemlenmiştir. Özellikle sertlik gibi parametrelerin hassas bir şekilde ölçümü yapılması gerekmektedir. Laboratuvarlarımızda geliştirdiğimiz ölçüm teknikleri sayesinde THz ışınları ile malzemelerin hem soğurma hem de dielektrik katsayılarını frekansa göre belirleyebildiğimiz için malzemelerde oluşan yapısal değişiklikleri çok hassas bir şekilde ölçebiliyoruz.

Bu çalışma kapsamında kullanılan örnekler ODTÜ Kimya bölümünde sentezlenmiştir. 1cm<sup>2</sup> ve yaklaşık olarak 1mm kalınlığındaki örnekler farklı plazma ortamlarında işlendikten sonra THz sistemlerimizle ölçümler gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki tabloda çift RF (düşük sıcaklıktaki yoğun plazma) plazma ortamında örneklerin işlendikleri parametreler listelenmiştir:

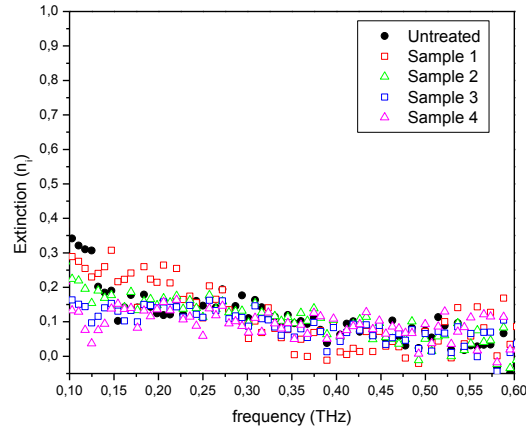
**Tablo 4.1.** Polipropilen Örneklerin Çift RF (Yüksek/Düşük Frekans) Plazma Ortamında İşlendikleri Parametreler

	Basınç (Argon Gazı)	Yüksek Frekans RF Gücü	Düşük Frekans RF Gücü	İşleme Zamanı
Örnek 1	0.1 torr	100 W	50 W	60 dk.
Örnek 2	0.1 torr	150 W	100 W	60 dk.
Örnek 3	0.1 torr	200 W	100 W	60 dk.
Örnek 4	0.1 torr	100 W	50 W	30 dk.

Yukarıdaki parametrelerde işlenen örnekler THz atımları ile karakterize edildi. İşlenmeyen ile işlenen örnekler arasında yapılan karşılaştırmada soğurma grafiğinde belirgin bir farklılık gözlemlenmedi. Ama kırılım indislerinde ise işleme zamanlarına/güçlerine göre farklılıklar gözlemlendi.

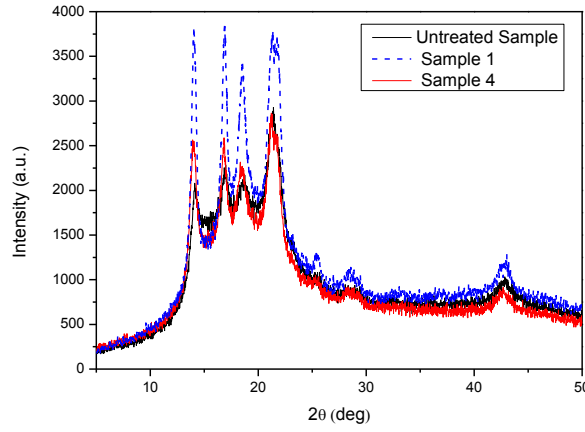


**Şekil 4.3.1** Tablo 1’de listelenen polipropilen örneklerin kırılım indisleri



**Şekil 4.3.2.** Tablo 1’de listelenen polipropilen örneklerin soğurma profilleri

Yoğun plazma ortamlarında düşük güçlerde (tahminen ısısal etkilerin azaldığı) ortamlarda polipropilen yapıların kırılım indislerinde bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebi olarak polipropilen yapıdaki kristalleşme olduğunu düşünmekteyiz. X-ışını yayılım (XRD) ölçümlerinde bu örneklerdeki kristalleşmenin daha fazla olduğunu gözlemledik:

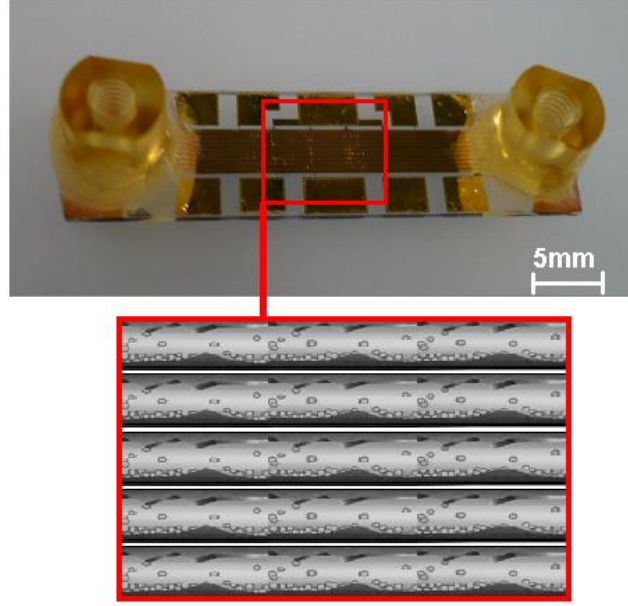


**Şekil 4.3.3..** Düşük güçte (Düşük Frekans 50/Yüksek Frekans 100W) işleme zamanına (30/60dk) göre elde edilen XRD grafikleri. Burada özellikle 60 dk. İşlenen örnekte daha fazla kristalleşme olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonucu THz ölçümleri desteklemektedir.

Yukarıdaki sonuçlara bakıldığında THz ışınlarının malzemelerdeki yapısal değişimlere çok hassas olduğunu gösterebildik. Yapılan bu çalışmanın detayları ilgili makalemizde bulunabilir [Akbar ve Altan 2013].

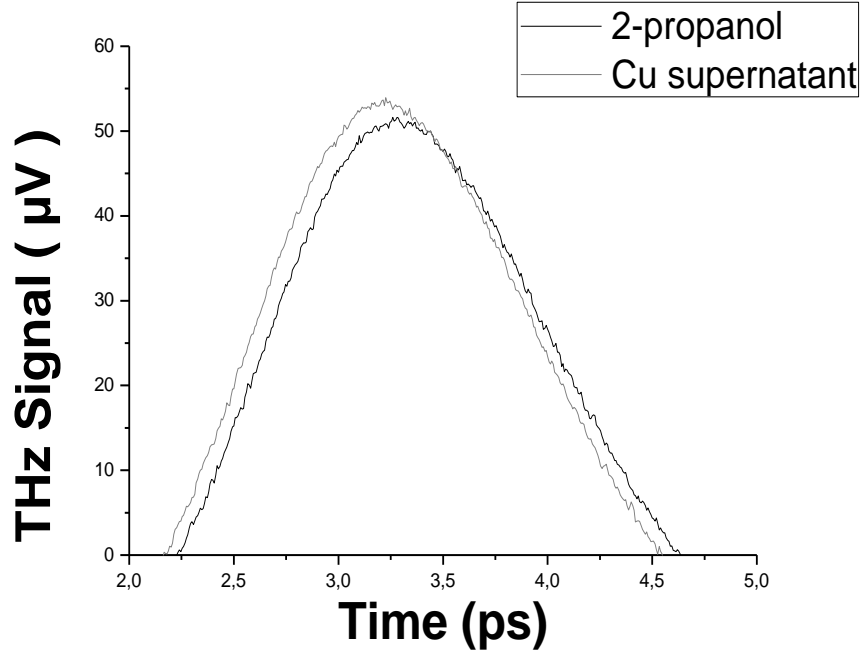
#### 4.4. Zamana Dayalı Terahertz Spektroskopi Sistemi-Nanoakışkanlar

Elektronik cihaz boyutlarının mikro ve nanometre ölçeğine küçülmesiyle, sistemlerin ısı kontrolü başlıca tasarım sorunu haline almıştır. Mikrokanal ısı alıcılar, yüksek alan/hacim oranına sahip olmaları nedeniyle, entegre devreler ve benzeri elektronik sistemlerin soğutulmasında etkin olarak kullanılmaktadır. Nanoakışkan (baz akışkan içinde nanoparçacık süspansiyonu) kullanımının, yalnızca baz akışkan kullanımına oranla daha fazla ısı uzaklaştırabildiği bildirilmiştir. Bu çalışma ile terahertz spektroskopi yöntemi kullanılarak, mikrokanallarda nanoakışkan davranışını deneysel olarak inceledik.



**Şekil 4.4.1.** ODTÜ'de aygıt soğutma sistemlerini incelemek amacıyla üretilen mikro-ölçekli kanallar.

Mikro-yapıdaki kanallardan geçen sıvıların sıcaklık emme kapasitesini artırmak amacıyla nanoakışkanların kullanılması önerilmiştir. Isı kontrolü cihaz ömrü açısından son derece önemli bir parametredir. Her 20 C° ısı artışı cihaz verimlilik ömrünü %50 oranında düşürdüğü yayınlanmıştır [Neetu ve Ramaprabhu 2008]. Buna ek olarak nanoakışkan içindeki metal nanoparçacıklar çok yüksek ısı iletim katsayısına sahip olduğu gösterilmiştir [Wen ve Ying 2004]. Ve literatüre bakıldığında nanoakışkan (baz akışkan içinde nanoparçacık süspansiyonu) kullanımının, yalnızca baz akışkan kullanımına oranla daha fazla ısı uzaklaştırabildiği bildirilmiştir [Bullen vd. 1997; Kersting vd. 2005]. Çalışmanın temel amacı mikro-kanallarda akan nanoakışkan sıvıların kanal içindeki ilerleyişlerini anlayabilmektir. Bu çalışmanın temelinde THz ışınların metallere geçmediği için dielektrik ortamda metal nanoparçacıklarına hassas olabileceği düşünülmüştür. Bunu kanıtlayabilmek için değişken parçacık miktarlı nanoakışkan sıvıların THz geçişlerini inceledik. Nanoakışkan sıvılar Dr. Bülend Ortaç (Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi Ankara)'ın lazer laboratuvarlarında bakır metali kullanarak lazer-ablasyon yöntemi ile 2-propanol sıvı içerisinde üretilmiştir [Amendola ve Maneghetti 2009]. Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan sıvılar 2mm genişliğinde kuvars küvetlere konulduktan sonra ODTÜ THz araştırma laboratuvarında proje kapsamında geliştirdiğimiz sistemler ile ölçümler gerçekleştirilmiştir (bkz. Şekil 3.4). Ölçümler şu an için zaman uzayında sadece incelenmiştir. Cu parçacık boyutlarının 10-20nm arasında olduğu zeta-potansiyel ölçüm yöntemleri kullanılarak doğrulanmıştır. Cu nanoakışkan sıvılarının, saf 2-propanol'a göre THz atımları geciktirmesi beklenilmiştir, ancak aşağıda gösterildiği gibi sonuçlar bunun tam tersini göstermektedir.



**Şekil 4.4.2.** 2-propanol içindeki Cu nanoparçacıkların zaman dayalı THz atım profil geçişindeki, THz pik (maksimum elektrik alanı) değerini sol (gecikme) yerine sağa (ışıkta daha hızlı yönde) kayması

THz atımın sola kayması ilk bakışta 2-propanol sıvısındaki ışık hızına göre katkılanmış 2-propanol sıvısında daha hızlı gittiği gözükse de aslen burada THz atımın dielektrik bir ortamdan (küvetin kuvarz duvarları) metalik bir ortama (metal katkılanmış nanoakışkan) geçişindeki negatif faz kaymasına tanık oluyoruz. Bu negatif kayma doğrudan metal nanoparçacık miktarına bağlı olarak değişmekte olduğunu düşünüyoruz. Bu etkiyi şöyle açıklayabiliriz: Bir dalga dik olarak bir dielektrik katmanından (indis  $n_1$ ) paralel iletken katmana geçtiğinde (indis  $n_2$  ve E-alan soğurması  $\alpha_f$ ) faz kayması ( $\chi_{12}$ , 1. denklem) ve alan geçişi ( $t_{12}$ , 2. denklem) şöyle ifade edilebilir:

$$(1) \tan \chi_{12} = -\frac{\alpha_f c}{\omega(n_1 + n_2)}$$

$$(2) t_{12} = \frac{2 n_1}{[(n_1 + n_2)^2 + \left(\alpha_f \frac{c}{\omega}\right)^2]^{\frac{1}{2}}}$$

Bu durumda yukarıdan görüldüğü gibi metal katmandaki faz kayması negatif oluyor. Devam eden çalışmalarımızda bu negatif kayma etkisinde sıvı içerisindeki nanoparçacık konsantrasyonlarını çıkarmayı hedefliyoruz.

#### **4.5. Zamana Dayalı Terahertz Spektroskopi Sistemi-Petrol Ürünleri**

Bu çalışmada çeşitli akaryakıt örneklerini laboratuvarımızda geliştirdiğimiz Zamana Dayalı Terahertz Spektroskopisi tekniğine dayalı analiz metotları kullanarak incelemeyi amaçladık. Burada, iki farklı yöntem izledik: mevcut ölçüm sisteminin örneklerle uygun olacak şekilde geliştirilmesi ve akaryakıt ürünlerini ayırt edici metot geliştirilmesi. Motorlu taşıtlarda kullanılan akaryakıtlar çok sayıda farklı molekülleri barındırır. Bu moleküller arasında değişik uzunluklarda karbon zincirleri, alkoller ve halka yapılı moleküller bulunmaktadır. Bu yüzden, petrol ürünlerini geleneksel spektroskopi teknikleriyle analiz etmek zordur. Terahertz (THz) spektroskopisi birçok alanda (petrol ürünlerinin ayırt edilmesinde, patlayıcı ve kirliliklerin tespitinde, kalite kontrol ve ilaç analizlerinde) yenilik sunan bir teknik olup malzemenin genliği, fazı gibi ayırt edici karakteristik özellikleri hakkında önemli bilgiler sunar. Yapılan çalışmalar sonucunda Türkiye genelinde katkı maddesi ya da sulandırıcı olarak kullanılan kimyasallar göz önünde bulundurularak petrol ürünlerinin karşılaştırmaların/denetiminin yapılabilmesi için yeni bir metot geliştirilmiştir.

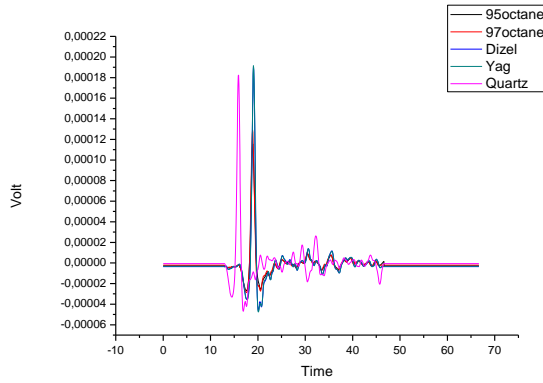
Türkiye’de 95 oktan, benzin tüketen taşıtlar için üretilmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yakıtlarda çeşitli amaçlarla katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bunların bir kısmı yakıtın oktan seviyesini arttırmaya ya da motor performansını artırmaya yöneliktir. Bunların yanı sıra yakıtlarda değişik amaçlarla etanol ve benzeri alkol karışımları da kullanılarak yakıtın birim fiyatı düşürülmeye çalışılmaktadır. Katkı miktarı üretici firmaya göre değişmektedir. Dizel ise önceleri sadece yük taşıyan kamyonlarda, tırlarda ve traktörlerde kullanılmış olup, günümüzde ise kazandırdığı düşük yakıt tüketimi özelliği ile birçok taşıtta var olan bir yakıt türüdür. Yakıtların ayrımı ve akaryakıttaki katkı maddelerinin analizi kaçak akaryakıtların tespit edilmesinde ve yakıt kalitesini belirlemede büyük önem taşımaktadır.

Motorlu taşıtlarda kullanılan akaryakıtlar çok sayıda farklı molekülleri barındırır. Bu moleküller arasında değişik uzunluklarda karbon zincirleri, alkoller ve halka yapılı moleküller bulunmaktadır. Bu yüzden, petrol ürünlerini geleneksel spektroskopi teknikleriyle analiz etmek zordur. Terahertz (THz) spektroskopisi birçok alanda (petrol ürünlerinin ayırt edilmesinde, patlayıcı ve kirliliklerin tespitinde, kalite kontrol ve ilaç analizlerinde) yenilik sunan bir teknik

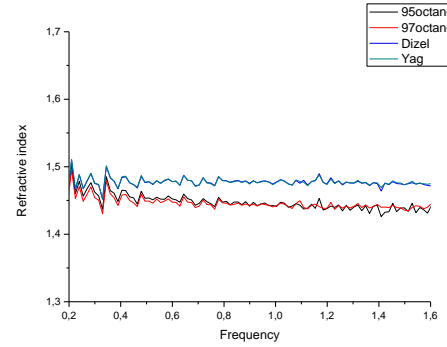
olup malzemenin genliği, fazı gibi ayırt edici karakteristik özellikleri hakkında önemli bilgiler sunar.

Bu çalışmada geliştirdiğimiz THz spektroskop sistemi ile alınan örnek ölçüm ve sonuçlar Şekil 4.5.1' de verilmiştir. Benzin örnekleri THz atımların odağında bulunan bir kuvarz küvet içine yerleştirilerek ölçümler kapalı bir kutu içinde kuru hava ve azot gazı takviyesi ile nemi alınmış bir ortamda gerçekleştirilmiştir.

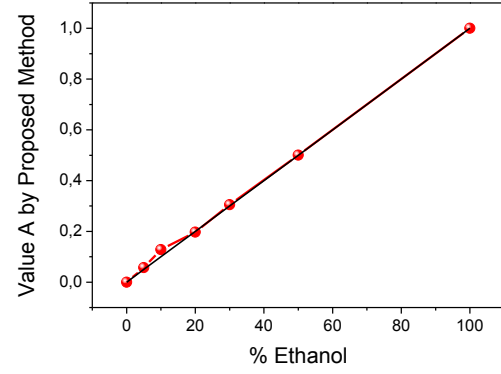
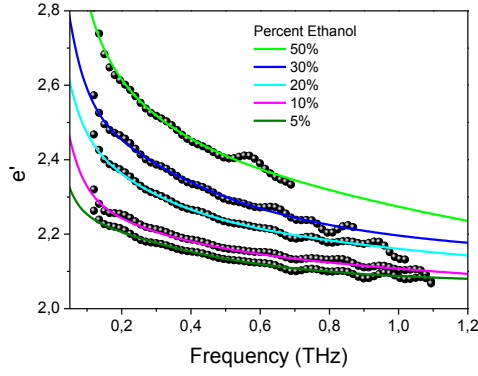
Dizel, benzin ve etanol katkılı benzin karışımlarının ölçümlerinden örneklerin frekansa bağlı soğurma katsayısı, kırılma indisi ve dielektrik sabitleri hesaplanmıştır. Dizel ve benzinin statik özellikleri karşılaştırılmış ve bu iki yakıtın kolayca ayırt edilebildiği ortaya konulmuştur. Ayrıca katkısız benzinler ve saf etanol, Debye modeli [Debye 1929; Barthel ve Buchner 1991] kullanılarak dielektrik sönümlenme parametreleri hesaplanmıştır. Etanol katkılı benzin karışımları ise basit katkılanma yaklaşımı yoluyla geliştirilen bir denklemle modellenmiştir. Önerilen methodla bu yeni yaklaşımın benzindeki etanol miktarını yaklaşık % 3 mutlak hata payı ile tespit edebileceği hesaplanmıştır.



**Şekil 4.5.1a.** Zamana dayalı THz ölçümleri. Kuvars küvet içinde yerleştirilen benzin örneklerinden elde edilen THz puls geçiş değerleri



**Şekil 4.5.1b.** Kırılma indisi ölçümleri. Dizel sıvını kırılma indisi 95 ve 97 oktan benzine göre çok daha farklı



**Şekil 4.5.1c.** Önerilen model (düz çizgiler). **Şekil 4.5.1d.** Kırmızı noktalar önerilen Etanol katkılı benzin karışımlarının modelden hesaplanan etanol miktarıdır. hesaplanan permittivity değerleri (siyah Siyah çizgi ise etanol miktarının ideal daireler).

Motorlu taşıtlarda kullanılan akaryakıtlar çok sayıda farklı molekülleri barındırır. Bu moleküller arasında değişik uzunluklarda karbon zincirleri, halka yapılı moleküller ve asfaltan vardır [Mohammed vd. 2011]. Bu yüzden geleneksel tekniklerle akaryakıtları ve katkı maddelerini analiz etmek zordur. Terahertz spektroskopi tekniğinin petrol ürünleri üzerine uygulanması ilk kez 2006 senesinde gerçekleşmiştir [Al-Douserı vd. 2007]. Bunun yanı sıra akaryakıtlar ve organik solventli karışımları (xylene, toluene, benzene) THz dalgaları ile incelenmiş ve optik özellikleri rapor edilmiştir [Jin vd. 2008; Kim vd. 2008]

Çeşitli akaryakıt katkılarının yakıtın yanma performansını yükselttiğini ve düşük emisyon değerleri verdiği gözlemlenmiştir [Al-Hasan vd. 2003; Wen vd. 2010]. Metanol, etanol, tersiyer butil alkol ve metil tersiyer bütıl eter oksijenlenmiş yakıt katkılarından sadece birkaç örnektir [Al-Hasan vd. 2003]. Bunların arasında etanol en çok kullanılan alkollerden biridir ve çevre dostu bir bileşiktir [Al-Hasan vd. 2003]. Akaryakıt içerisinde izin verilen etanol kullanımı ülkeden ülkeye değişmektedir. Örnek olarak Amerika Birleşik Devletleri Environmental Protection Agency, 2007 ve sonrası yapımı otomobil ve kamyonlarda benzinde %15'e kadar etanol bulunmasına izin vermektedir. Diğer yandan Avrupa'da benzinde etanol katkılanma limiti ise %10'a yükseltilmiştir. Türkiye'de ise Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu 2013 yılında benzinin içindeki minimum etanol miktarının %2 (V/V) olmasına, 2014'de ise bu değer %3'e (V/V) çıkarılmasına karar vermiştir. Ancak kaçak etanol katılımı ve oranların %12-20 gibi rakamlara taşınması akaryakıt şirketlerine ek-gelir sağladığından tercih edilmektedir. Bu nedenle, benzinin içindeki etanolün tayini ve analizinin %1 civarında olması önemli bir hale gelmekte ve güvenilir bir tekniğe olan ihtiyaç kaçınılmaz olmaktadır. Yukarıdaki ölçümlerden

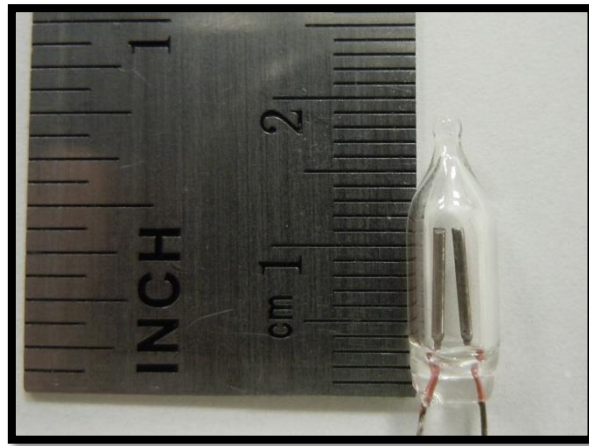


görüldüğü gibi geliştirilen THz ölçüm tekniğinin ön çalışmalarımızda etanol-95 oktan karışımlarını analiz edebilme kabiliyeti göz önüne alındığında hızlı, doğru ve etkin çözüm olma yolunda umut veren bir teknik olacağını göstermektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarımızı uluslararası dergilerde yayınladık [Arık vd. 2014].

#### 4.6. Zamana Dayalı Terahertz Spektroskopi Sistemi-Kısa DC Deşarj Lambaları

Neon indikatör lambası, cam kapsül, iki adet elektrot ve Penning karışımından ( %98–99.5 neon gazı ve %0.5–2 argon gazı) meydana gelen, üretim aşaması basit ve masrafsız olan bir gaz deşarj lambasıdır. Bu lambanın elektrotları arasında (AC ya da DC) voltaj farkı uygulandığında elektrotlar arasında oluşan elektrik alan, dış etkenler (çevresel ışık, çevresel radyoaktivite, vb.) yüzünden oluşan serbest elektronları ivmelendirir. Bu da serbest elektronların ortamda bulunan neon ve argon atomları ile elastik olmayan çarpışmasını artırır. Bu çarpışmalar sonucunda iyonlaşan neon ve argon gazları cam kapsül içerisinde neon-argon plazmasını oluşturur. Plazmanın karakteristik özelliklerini cam kapsül içerisinde miktarca baskın olan neon gazı belirler.

Plazmanın sürdürülebilmesi için elektrotlara 70-120V arasında değişen sabit potansiyel uygulanmaktadır. Plazma üzerinden geçen doğru akım ise 1-14mA arasında değişmektedir. Oluşturulan plazma abnormal plazma bölgesindedir. Bu bölgede elektrotlar arasına uygulanan voltaj arttırıldığında plazma içerisinde akan akım da artmaktadır. Fakat voltaj ile akım arasında ki bu bağıntı doğrusal değildir. Voltaj uygulanması ile gerçekleşen ışıma neon lambanın katodu çevresindedir ve bu bölgeye genel olarak kısa deşarjlarda negatif ışıma bölgesi denir. Daha önce yapılan çalışmalar sonucunda neon indikatör lambalarının detektör olarak kullanılabileceği gösterildiği için bu lambalar literatürde parlamalı deşarj detektör (GDD-glow discharge detector) olarak geçmektedir.



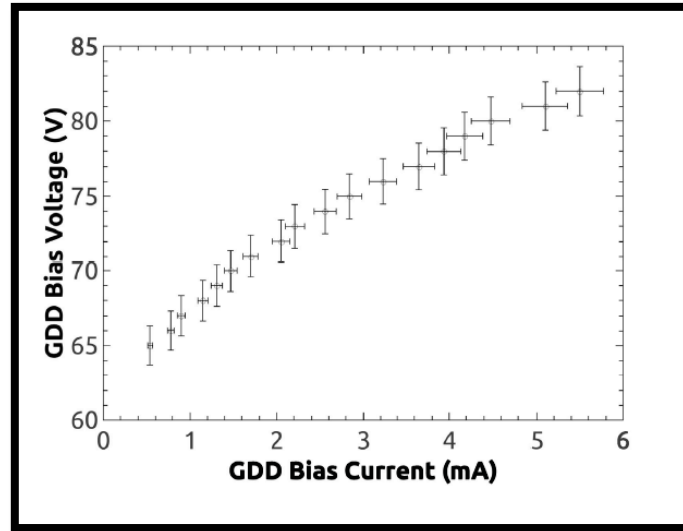
Şekil 4.6.1. Neon indikatör lamba

ODTÜ Fizik Bölümü Terahertz Araştırma Laboratuvarı'nda kurulumu gerçekleşen, kaynak olarak frekans çiftli kip-kilitli Er katkılı fiber lazer kullanılan zamana dayalı terahertz spektroskopi sistemi ile gerçekleştirilen ölçümlerde kullanılan GDD Şekil 1'de verilmiştir. Bu ölçümlerde terahertz pulsunun GDD'den geçişi sırasında plazma ile etkileşiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Referans olarak sadece gaz içeren cam kapsül kullanılması gerekirken, elektrotların kullanılan GDD'den çıkartılması durumunda tüm yapısı bozulacağı için bu etkileşimin belirlenebilmesi için referans olarak GDD kapalı durumda iken ölçümler alınmıştır. GDD sistem içerisine yerleştirilirken dikkat edilen en önemli unsur polarizasyon olmuştur. Plazma ile terahertz etkileşiminin maksimum olabilmesi için, elektrotlar arası oluşan elektrik alan ile terahertz polarizasyonunun paralel olması gerekmektedir. Bunlar göz önünde bulundurulduğunda, sistemde üretilen terahertz paralel polarizasyona sahip olduğu için GDD sisteme Şekil 4.6.2'de ki gibi yerleştirilmiştir.



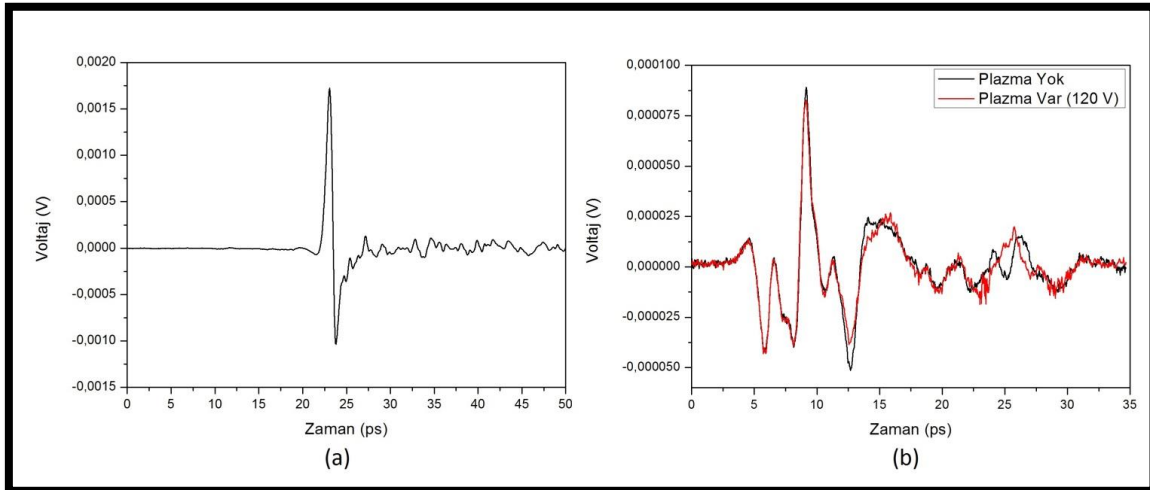
**Şekil 4.6.2.** Voltaj uygulanan GDD-Parlamalı deşarj detektör

İlk olarak elektrotlara 70-120V arasında değişen sabit potansiyel uygulanmış ve plazma üzerinden geçen doğru akımın değişimine bakılmıştır. Plazmanın abnormal bölgesinde görülen voltaj ve akımdaki artış, alınan ölçümler sonucu elde edilen voltaj-akım grafiğinde gösterilmiştir. Şekil 4.6.3'te verilen voltaj-akım grafiği göstermektedir ki GDD içerisinde oluşan plazma abnormal bölgededir.



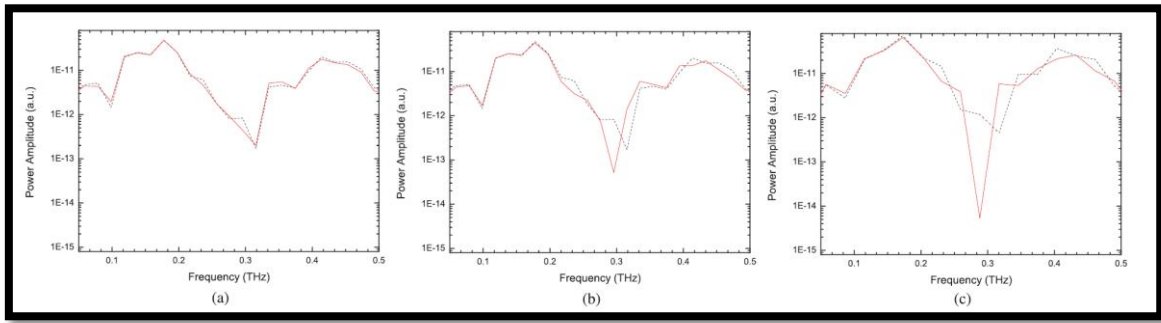
**Şekil 4.6.3.** GDD içerisinde ki plazmanın abnormal bölgede çalıştığını gösteren akım-voltaj grafiği

Şekil 4.6.4 (a)'da kullanılan sistem ile GDD olmadan gerçekleştirilen bir hava ölçümünün terahertz görüntüsü verilmiştir. Referans olarak kullanmak için yerleştirilen GDD ile sinyalin şekli, Şekil 4.6.4 (b)'de verildiği gibi değişmiştir. Cam tüpün şeklinin ve yapısının yanı sıra elektrotların da sebep olduğu bu farklı sinyal şekli, referans olarak kullanılmış ve voltaj uygulanarak alınan GDD ölçümleri ile kıyaslanmıştır. Şekil 4.6.4'de verilen (a) ve (b) grafiklerinin zaman eksenleri farklı taramalara ait olmalarından dolayı zamanda gerçekleşen kaymayı göstermemektedir. Bunun yanı sıra GDD'ye 120V uygulanması ile terahertz sinyalinde gerçekleşen değişim de Şekil 4(b)'de görülmektedir.

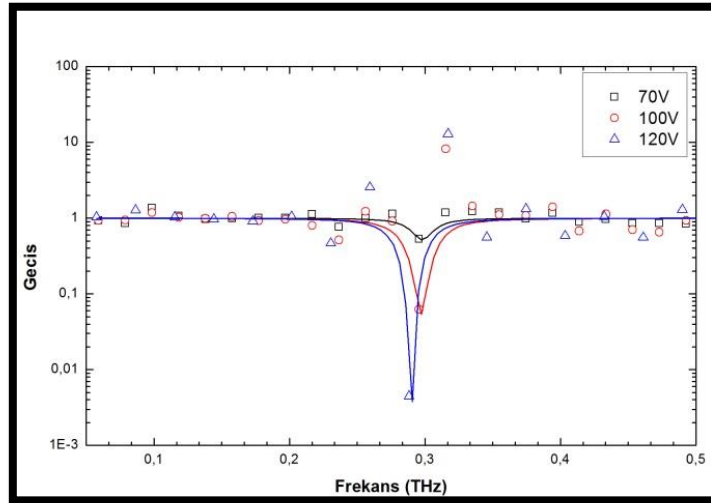


**Şekil 4.6.4.** Frekans çifli kip-kilitli Er katkılı fiber lazer kullanılan zamana dayalı terahertz spektroskopisi sistemi ile alınan (a) hava ölçümünün terahertz görüntüsü (b) kapalı ve açık GDD ölçümlerinin terahertz görüntüsü

Zaman uzayında alınan bu ölçümler Fast Fourier Transform algoritması yardımı ile frekans uzayına geçirildiğinde ise referans olarak alınan kapalı durumda ki GDD ölçümünde 0.32THz’de bir dip görülmüştür. Şekil 4.6.5’de verilen grafiklerde siyah kesik çizgi ile gösterilen referans ölçümleri, 70V-100V-120V uygulanan GDD ölçümleri ile kıyaslanmaktadır. Her uygulanan farklı değerdeki voltaj ölçümleri için referanslar tekrardan alınmış, sistemde zamana bağlı değişebilecek etkiler en aza indirilmeye çalışılmıştır. Uygulanan voltajın artması ile dip noktasının daha düşük frekansa doğru kaydığı ve dip derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum uygulanan voltaj olan 120V’un Şekil 4.6.5(c)’de verilen grafiğine bakıldığında 20dB’lik bir düşüş görülmektedir.



**Şekil 4.6.5.** Güç spektrumu grafiklerinde siyah kesik çizgiler voltaj uygulanmayan GDD’nin ölçümü iken kırmızı çizgiler ise (a)70V (b)100V (c)120V uygulanan GDD’nin ölçümleridir. Güç değerlerinin oranlanması ile elde edilen geçiş grafiklerine bakıldığında zaman da dip derinliğinin uygulanan voltaj ile arttığı görülmektedir.



**Şekil 4.6.6.** Terahertz dalgasının 0.05 THz-0.5 THz aralığında geçiş spektrumu

ODTÜ THz Araştırma Laboratuvarı’nda gerçekleştirilen bu çalışma, “IEEE Sensors” dergisinin Temmuz 2013 sayısında " Characterization of a Glow Discharge Detector With Terahertz Time Domain Spectroscopy" başlığı ile basılmıştır [Cinar vd. 2013].

#### 4.7. Zaman Çözünümlü Terahertz Spektroskopi Sistemi-Pompa/Prob (Sonda)

UNAM'da bulunan yükseltilmiş Ti: Yakut lazerin kaynak olarak kullanıldığı zaman çözünümlü terahertz spektroskopi sisteminin pompa ışını için OPA kullanılması ilk olarak düşünülmüştür. OPA (optical parametric amplifier) sistemi 300nm ile 10µm arasında dalga boyuna sahip, 5 ile 125mW ortalama güç ile fs mertebesinde pulslara sahiptir. Yukarıda bahsedildiği gibi UNAM'daki lazerdeki sorunlardan dolayı OPA sistemi verimli olarak kullanılamamıştır ve pompalama dalga boyu olarak lazerden gelen atımlar ve bu atımları kendi kurduğumuz ikinci harmonik üretimi sonrası elde ettiğimiz kısa dalga boylu atımlar sayesinde görünür pompa / THz prob deneyleri gerçekleştirebildik.

UNAM'da kurulan zaman çözünümlü terahertz spektroskopi sistemi her üç kolunda da (üretim, belirleme, pompa) hareket kabiliyetine sahiptir. Bu sayede üç farklı tarama yapabilmektedir; bu taramalara göre elde edilen sonuçlar bu raporun 4.2 nolu kısmında detaylandırılmıştır:

**Tablo 4.2.** Görünür Pompa/THz Prob Sisteminde Farklı Işın Kollarının Hareketine Göre Alınabilecek Ölçüm Çeşitleri

	1 Boyutlu Belirleme Taraması	1 Boyutlu Pompa Taraması	2 Boyutlu Tarama (i)	2 Boyutlu Tarama (ii)
Belirleme	Tarama	Sabit	Sabit	Tarama snc.
Üretim	Sabit	Sabit	Tarama (Ters)	Sabit
Pompa	Sabit	Tarama	Sabit	Tarama snc.

Açıklamalar:

##### 1 Boyutlu Belirleme Taraması:

Üretim ve pompa kollarında bulunan stageler sabit tutulurken, sadece belirleme kolunda bulunan stage ile tarama yapılmaktadır. Bu tarama metodu, sadece t=0 anından en az 3ps sonra toplanan veriler için anlamlıdır.

##### 1 Boyutlu Pompa Taraması:

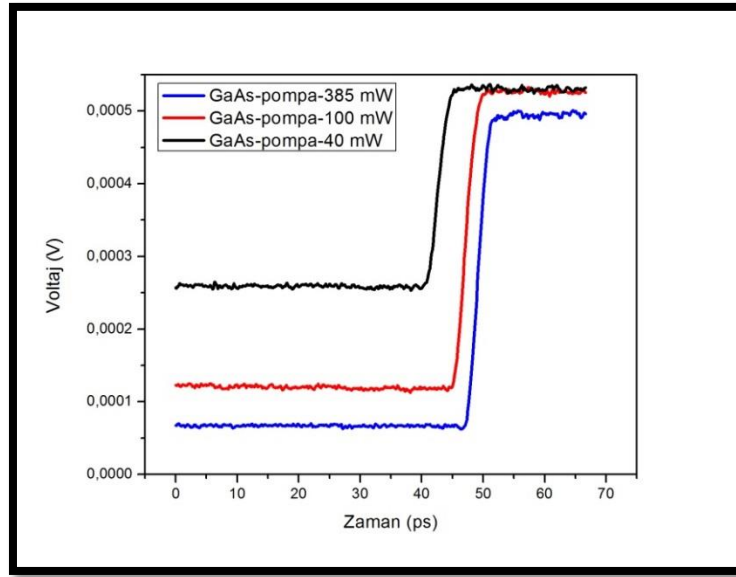
Üretim ve belirleme kollarında bulunan stageler sabit tutulurken, sadece pompa kolunda bulunan stage ile tarama yapılmaktadır. Bu tarama methodunda belirleme kolunda bulunan stage terahertz pulsunun pik noktasında sabitlenmektedir. 1-Boyutlu pompa taraması ile ölçülen örneğin gerçekleştirdiği ortalama terahertz Emilimi ile ilgili önemli bilgiler elde edilmektedir. Zaman çözünümlü terahertz spektroskopisinde ki uygulanan bu tür 1-Boyutlu tarama, geçişin ölçüldüğü diğer zaman çözünümlü pompa-belirleme teknikleriyle benzerdir.

## 2 Boyutlu Tarama:

1 Boyutlu belirleme ve pompa taramalarının yetersiz olduğu durumlarda 2 Boyutlu tarama uygulanması gereken methodur. 1 Boyutlu methodlar ile terahertz pulsunun frekans aralığında ki ortalama dinamiği ölçülmektedir. Fakat optik pompa terahertz pulsunun büyüklüğünü ve fazını değiştirebileceğinden dolayı, dinamik süreç ile ilgili tüm bilgilerin edinilebilmesi için, 2 Boyutlu tarama yapılması gerekmektedir. Bu tarama metodu iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir ve bu iki teknik eşdeğerdir;

- (i) Pompa ve belirleme kollarında bulunan stageler sabit tutulurken, sadece üretim kolunda bulunan stage ile ters yönde tarama yapılmaktadır.
- (ii) Pompa ve belirleme kollarında bulunan stageler birbiri ile senkronize bir şekilde taramayı gerçekleştirirken, sadece üretim kolunda bulunan stage sabit şekilde tutulmaktadır.

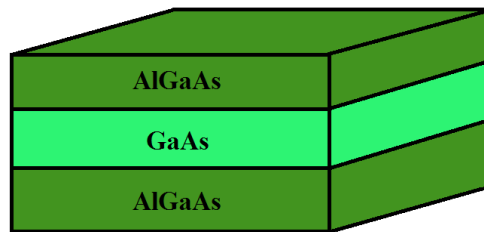
İlk ölçümlere literatürde sıkça rastlanan GaAs yarıiletkeni ile başlanmıştır. 800nm merkez dalga boyunda pompa enerjisi değiştirilerek çeşitli ölçümler alınmış ve sinyaldeki değişim incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.7.1’de verilmiştir. Pompa gücünün artırılması ile zaman ekseninde gerçekleşen kayma ve sinyal seviyesinde gerçekleşen değişim dikkat çekmektedir.



**Şekil 4.7.1.** Pompa enerjisine bağlı olarak GaAs sinyalinde görülen değişim

Literatür taraması yapıldığında GaAs için aynı değişimlerin bu ölçümü gerçekleştiren diğer araştırmacılar tarafından da gözlemlendiği görülmüştür.

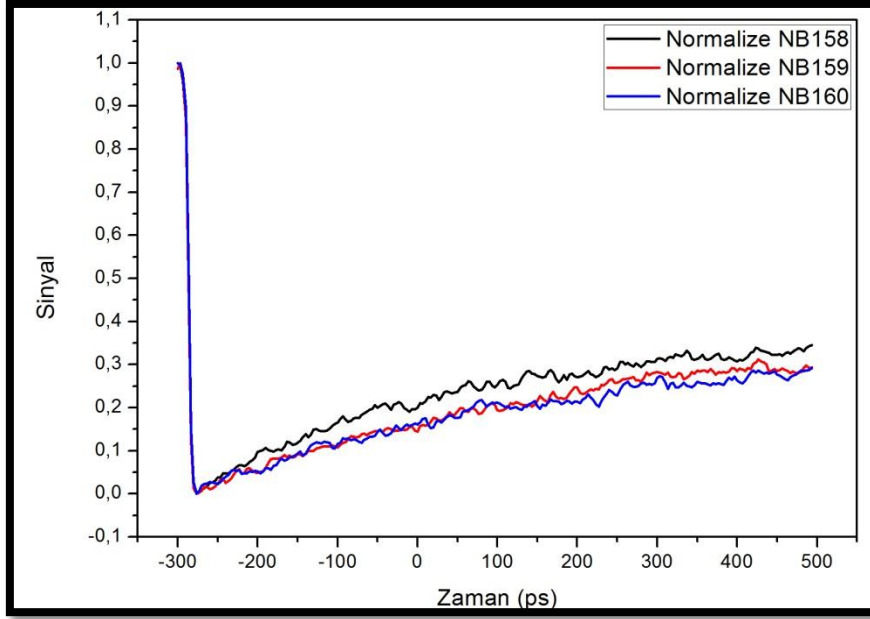
Bir diğer ölçümde ise farklı oranlarda katkılanmış kuantum kuyuları incelenmiştir. Kuantum kuyuları, birçok kuantum mekaniksel etkinin kontrol edilmesine ve gözlemlenmesine olanak sağlayan ince katmanlı yarı iletken yapılardır. Kuantum kuyuları bir katman yarı iletkenin, daha geniş bant aralığına sahip iki katman yarı iletkenin arasına sıkıştırılması ile oluşturulur. Şekil 4.7.2’de kuantum kuyu yapısı basit olarak gösterilmiştir. Bu örnekte düşük bant aralığına sahip olan GaAs (1.424eV), yüksek bant aralığına sahip olan ise AlGaAs’tır(1.42eV ile 2.36eV arasında). Kuantum kuyu yapıları Doç. Dr. Bülent Aslan’ın araştırma grubu tarafından üretilmiştir (Fizik Bölümü, Eskişehir Anadolu Üniversitesi).



**Şekil 4.7.2.** Kuantum kuyu yapısı

Gerçekleştirilen ölçümlerde üç farklı örnek kullanılmıştır. İlk örnek, NB158, referans olarak kullanılan katkılama yapılmamış olandır. İkinci ve üçüncü örnek ise (NB159 ve NB160) sırası ile 1x ve 2x Si katkılanma yapılmış tabakalardan oluşturulmaktadır. 800nm merkez

dalga boyunda, yaklaşık olarak 7mW güce sahip, 1kHz tekrarlama hızında ışın pompa olarak kullanılmıştır.



**Şekil 4.7.3.** Kuantum kuyu örneklerinin normalize edilmiş sonuçları

Şekil 4.7.3’de elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Örneklerin fotoyüklerinin yaşam sürelerine bakıldığında NB158, NB159, ve NB160 için sırası ile 310ps, 461ps, 526ps olarak elde edilmiştir ve katkılama seviyesinin artışı ile yaşam süreleri arasında doğrusal bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır.

## 5. SONUÇ

Proje kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda uyguladığımız THz ölçüm tekniğinde kayde değer gelişmeler kaydettik. Yaptığımız çalışmalar sonucu kurulan THz spektrometre sistemleri ile artık birçok farklı malzeme üzerinden ölçümler gerçekleştirebiliyoruz. Örneğin benzin, etanol gibi farklı sıvıları rahatlıkla ölçebiliyoruz, aynı zamanda biyolojik örnekleri ölçebilmek için belli bir deneyim kazandık. Yaptığımız bu çalışmalar sonucunda daha ileri düzeydeki araştırmalara yönelmeye başladık, örneğin L-triptofan amino asitin kanser hücrelerindeki etkisini araştırmaya başladık. Bunların yanında geliştirdiğimiz ölçüm yöntemleri sayesinde önceden hiç araştırılmamış konulara da yönlenebildik. Bu konulardan birisi mikro kanallardaki nanoakışkanlar. Bu güne kadar literatürde THz atımlara dayanan tekniklerin nanoakışkan sıvıların özelliklerini ölçmek için hiç kullanılmadığını tespit ettik. Ancak yaptığımız ölçüm ve analizler sonucunda THz atımların sıvı içerisindeki parçacık miktarına çok hassas olduğunu



tespit ettik. Şu an çalışmalarımız görülen değerleri modelleme üzerine yoğunlaşmıştır. Yakın zamanda yaptığımız çalışmaları saygın dergilerde yayınlamayı planlıyoruz. Bir başka yeni araştırma konusu, plazmaların THz atımları ile etkileşmesi. Literatüre baktığımızda düşük ısıdaki bir plazmanın doğal olarak düşük plazma frekansı nedeniyle THz atımları ile etkileşmemesi gerekliliğine karşın yaptığımız ölçümler bunun tersini göstermektedir. Bu sonuçlara sadece dünyada birkaç grup ulaşmıştır. THz uygulamaları halen yeni bir konu olması nedeniyle araştırılacak konular açısından olanaklar tükenmeyecek gibi gözüküyor. Bu durumda geliştirdiğimiz teknikler ve kazandığımız ölçüm yetenekleri bizi yeni buluşlara doğru götürecektir. Proje kapsamında ızgara tipi yapıların THz ölçümlerini karakterize ederken fiber lazer kesim teknikleri kullanarak son derece düşük maliyetle üretilen ızgaraların neredeyse mükemmel bir filtre yapısı olarak görev alabileceğini gösterdik. Bu tip çalışmalar özellikle iletişim teknolojileri için önem teşkil etmektedir. Yakın zamanda haberleşme ağıları THz frekanslarına çıkacak ve bu durumda hem pasif hem de aktif bileşenlere ihtiyaç duyulacaktır. Bu projede yaptığımız çalışmalar bu tip bir gelişime destek verecektir.

Geliştirdiğimiz spektral tabanlı ölçüm tekniklerine ek olarak halen geliştirmekte olduğumuz taramalı görüntüleme sistemleri ile özellikle biyolojik dokuların üç-boyutta görüntülerini elde etmeyi hedefliyoruz. Proje kapsamında yaptığımız çalışmalar diş ve deri gibi dokuları yüksek çözünürlükle görüntüleyebileceğimizi göstermektedir. Özellikle diş gibi sert dokularda THz atımların diğer görüntüleme tekniklerine göre avantajları var. Örneğin X-ışınları gibi iyonize etmeyen bir radyasyon olduğu için özellikle hamile ve çocuk hastalar için ileride önemli bir teknik olabilecektir. Proje kapsamında çalıştığımız görüntüleme tekniklerini daha da geliştirerek klinik ortamlarda T-ışınların hastalıkların teşhisinde kullanılmasını amaçlıyoruz.

Projenin en önemli başarılarından biri ülkemizdeki ilk görünür pompa/THz sonda sistemin geliştirilmesidir. Projede yapılan çalışmalar süresince yaşanan bazı teknik sorunlar nedeniyle istenilen performansı elde edemedik. Örneğin UNAM'da geliştirdiğimiz ve zaman çözünümlü spektrometre diye adlandırdığımız bu tekniğin spektral ölçümlerde sinyal gürültü oranı ODTÜ'de kurulan zamana dayalı ölçüm sistemlerimizden çok daha kötü. Bu nedenle pompa/sonda tekniklerinde önemli bir metod olan iki boyutta örneğin dinamik tepkisini ölçme deneyini gerçekleştiremedik. Yani frekansa göre incelenmesi istenilen örneklerin dinamik tepkisini ölçemedik. Sadece frekans uzayından bağımsız olarak malzemelerin dinamik tepkisini ölçebildik (tek boyut diye adlandırılan ölçüm metodu). Ve yapılan ölçümler "bulk" denilen yoğun yarı-iletken malzemeler (Si veya GaAs gibi) üzerinden gerçekleştirildi. UNAM'daki araştırmacılar ile proje kapsamında yaptığımız iş birliği sonucunda sistemimizin orada devam edeceğini bekliyoruz. Böylelikle sistemin sinyal gürültü oranının iyileştirmeyi ve özellikle bu iki boyutta pompa/sonda deneyini gerçekleştirmeyi amaçlıyoruz. Gelecekteki

hedeflerimizden sinyal seviyesini ve ölçüm hassasiyetini iyileştirerek nanomateryal ve ya nanokompozit malzemelerin dinamik ölçümlerini gerçekleştirebilmektir. Bu çalışmalar esnasında OPA sistemini doğru çalıştırabilmemiz gerekmektedir.

Bu proje kapsamında, kurulan sistemlerde yapılan iyileştirmeler ve yeni geliştirilen ölçüm teknikleri sonucunda:

- Motorin ve benzin arasında belirgin farklar tespit ettik ve sıvılarda geçerli olan Debye modelini kullanarak THz ışınların geçişlerini simüle ettik.
- Benzindeki etanol gibi katkı maddelerinin tespiti ve benzin dielektrik katsayısına olan etkisini modelledik
- Triptofan amino asitin farklı konsantrasyonlarda hem frekans uzayında hem de zaman uzayında tespitin mümkün olabileceğiniz gösterdik
- Polimerlerin çift RF plazma ortamında güçlendirilmesinin (yani kırılım indisindeki artışın) polimerin kristalizasyonuna bağlı olduğunu gösterebildik.
- Piyasada indikatör lambası diye geçen Kısa DC Deşarj lambalarının THz ışınlarını tespit edebildiğini gösterdik
- GaAs temelli yarı-iletken malzemelerin foto-uyarı sonrası tepkilerini ölçtük. Kuantum kuyularda Si katkılanmasının artmasıyla elektron hal geçiş sürelerinin arttığını gözlemledik (bu kapsamda çalışmalarımız halen devam ediyor)
- Diş ve deri gibi biyolojik dokuların incelenmesi ve üç boyutta görüntülenebilmesi için sistemler geliştirdik (3B görüntüleme çalışmalarımız halen devam ediyor)
- Dalga kılavuz tipi ızgara yapılarda frekansa dayalı THz geçişlerini etkileyen parametreleri belirledik ve yüksek performans (istenilen frekans aralığında neredeyse yüzde yüz geçirgen olan) sergileyen filtre yapıları geliştirdik.

Yapılan çalışmalar teknolojik ve ürün imalatı yönünden yeni Ar-Ge projelerine açık bir konudur. Proje sürecinde, iki bursiyer öğrencisi yetiştirilmiş, biri yurtdışında doktora programında çalışmalarına devam ederken diğeri de yakın zamanda tez savunmasını gerçekleştirmesi beklenilmektedir. Bu kadar geniş bir ölçüm yelpazesi sunabilen bu tekniklerin ülkemizde geliştirilmesi ve desteklenmesi ileride birçok kuruluşumuzda bilim çalışmalarına hız ve önem katacaktır.

## 6. REFERANSLAR

A.D. Mohammed, I.A. Mohammed, C. S. Ajinomoh. Upgrading Heavy Crude Oil Potentials through Microwave Assisted Distillation. *Journal of Innovative Research in Engineering and Science*. 2011;137–47.

Akbar D ve Altan H, "Characterization of polypropylene treated under dual-RF plasma using terahertz time-domain spectroscopy," *J. Mat Science* 48, 8209-8214 (2013)

Al-Douser FM, Chen Y, Zhang X-C. THz wave sensing for petroleum industrial applications. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 2007 Jan 30;27(4):481–503.

Al-Hasan M. Effect of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. *Energy Conversion and Management*. 2003 Jun;44(9):1547–61.

Altan, H., B. L. Yu, S. A. Alfano, and R. R. Alfano,, "Terahertz (THz) Spectroscopy of Freon–11 (CCl<sub>3</sub>F, CFC–11) at room temperature," *Chem. Phys. Lett.* 427 241, (2006).

Altan, H., Federici, J., Grebel, H., Lan, A., Huang, F., "Characteristics of Single Walled Carbon Nanotubes and Ion Implanted Silicon Nanoclusters using Terahertz Spectroscopy," *J. Appl. Phys.* 96 6685 (2004).

Amendola V and Meneghetti M, "Laser ablation synthesis in solution and size manipulation of noble metal nanoparticles,"*Phys. Chem. Chem. Phys.*, 11, 3805-3821 (2009)

Arik E, Altan H, and Esenturk O, Dielectric Properties of Ethanol and Gasoline Mixtures by Terahertz Spectroscopy and an Effective Method for Determination of Ethanol Content of Gasoline, *The Journal of Physical Chemistry A* 118 (17), 3081-3089 (2014)

Auston, D. H., Cheung, K. P., Valdmanis, J. A., Kleinman, D. A., "Coherent time-domain far-infrared spectroscopy with femtosecond pulses", *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision* , 1, 1278-1278 (1984).

Auston, D. H., Nuss, M. C., "Electrooptic generation and detection of femtosecond electrical transients", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 24, 184-197 (1988).

Barthel, J.; Buchner, R. *Pure Appl. Chem.* 1991, 63, 1473–1482.

Beard, M. C.; Turner, G. M.; Schmuttenmaer, C. A., "Subpicosecond carrier dynamics in low-temperature grown GaAs as measured by time-resolved terahertz spectroscopy", J. Appl. Phys., 90, 5915 (2001).

Bowden, B., Harrington, J. A., and Mitrofanov, O., "Low-loss modes in hollow metallic terahertz waveguides with dielectric coatings," Applied Physics Letters 93, 181104 (2008).

Brener, I., Dykarr, D., Frommer, A., Pfeiffer, L. N., Lopata, J., Wynn, J., West, K., and Nuss, M. C., "Terahertz emission from electric field singularities in biased semiconductors," Opt. Lett., 21, 1924–1926 (1996).

Brucherseifer, M., Nagel, M., Bolivar, P., Kurz, H., Bosserhoff, A., and Uttner, R. B., "Label-free probing of the binding state of dna by time-domain THz sensing," Applied Physics Letters 77(24), 4049 (2002).

Buersgens, F., Kersting, R., Chen, H.-T., "Terahertz microscopy of charge carriers in semiconductors," Appl. Phys. Lett. 88, 112115 (2006).

Bullen A, S.S.Patel and P. Saggau, High-Speed, Random Access Fluorescence Microscopy, Biophysical Journal Volume 73 July 1997 477-491

Chen, H. T., Kersting, R., and G. C. Cho, "Terahertz imaging with nanometer resolution," Appl. Phys. Lett. 83, 3009 (2003)

Cinar K, Bozacı H M, Altan H, "Characterization of a Glow Discharge Detector with Terahertz Time Domain Spectroscopy," IEEE Sensors J 13, 2643-2647 (2013)

Debye, P. J. W. Polar molecules; The Chemical Catalog Company, inc., 1929.

Federici, J. F., Schulkin, B., Huang, F., Gary, D., Barat, R., Oliveira, F., Zimdars, D., THz imaging and sensing for security applications, explosives, weapons and drugs, Semicond. Sci. Technol. 20, 5266 (2005).

Fischer, B. M., Walther, M., and Jepsen, P. U., "Far-infrared vibrational modes of DNA components studied by terahertz time-domain spectroscopy," Phys. Med. Biol. 47, 3807–3814 (2002).

Fitch, M. J., and Osiander, R., "Terahertz Waves for Communications and Sensing," Johns Hopkins APL Technical Digest Vol 25 N 4, 348 (2004).

Fitzgerald, "Catalogue of human tissue optical properties at terahertz frequencies," *Journal of Biological Physics* 29(2-3), 123 (2003).

Han, P. Y. and Zhang, X.-C., "Free-space coherent broadband terahertz time-domain spectroscopy," *Meas. Sci. And Tech.*, 12 1747, (2001).

Han, P. Y., Cho, G. C., and Zhang, X.-C., "Time-domain transillumination of biological tissues with terahertz pulses," *Optics Letters* 25(4), 242 (2000).

Hasegawa N, Löffler T, Thomson M and Roskos H G, "Remote Identification of protrusions and dents on surfaces by THz reflectometry with spatial beam filtering and out-of-focus detection," *Appl. Phys. Lett.* 83, 3996 (2003)

Hendry, E., Wang, F., Shan, J., Heinz, T. F., and Bonn, M., "Electron Transport in TiO<sub>2</sub> Probed by THz Time-Domain Spectroscopy," *Phys. Rev. B* 69, 081101 (2004).

Hermann, M., Tani, M., Watanabe, M., and Sakai, K., "Terahertz imaging of objects in powders," *IEEE Proc.-Optoelectron.* 149, 116 (2002).

Hu, B. B., Nuss, M. C., "Imaging with THz waves," *Opt. Lett* 20, 1716 (1995).

Huber, R.; Brodschelm, A.; Tauser, F.; Leitenstorfer, A., "Generation and field-resolved detection of femtosecond electromagnetic pulses tunable up to 41 THz", *Appl. Phys. Lett.*, 76, 3191 (2000).

Jin Y-S, Kim G-J, Shon C-H, Jeon S-G, Kim J-I. Analysis of Petroleum Products and Their Mixtures by Using Terahertz Time Domain Spectroscopy. *J. Korean Phys. Soc.* 2008 Oct;53(4):1879–85.

Kawase, K. 2004. "Terahertz imaging for drug detection and large-scale integrated circuit inspection", *Opt. Photonics News*, 15, 34-39.

Kersting R, Hou-Tong Chen, Nicholas Karpowicz and Gyu Cheon Cho, Terahertz microscopy with sub micrometer resolution, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 7 (2005) S184–S189

Kim G-J, Jeon S-G, Kim J-I, Jin Y-S. Terahertz time domain spectroscopy of petroleum products and organic solvents. 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2008. IRMMW-THz 2008. 2008. page 1 –2.

Knoesel, E., Bonn, M., Shan, J., and Heinz, T. F., "Charge Transport and Carrier Dynamics in Liquids Probed by THz Time-Domain Spectroscopy," *Phys. Rev. Lett.* 86, 340 (2001).

Knoesel, E., Bonn, M., Shan, J., Wang, F., and Heinz, T. F., "Transient Conductivity of Solvated Electrons in Hexane Investigated with Time-Domain THz Spectroscopy," *J. Chem. Phys.* 121, 394 (2004).

Köhler, R., Tredicucci, A., Beltram, F., Beere, H. E., Linfield, E. H., et al., "High-Performance Continuous-Wave Operation of Superlattice THz Quantum Cascade Lasers," *Appl. Phys. Lett.* 82, 1518–1520 (2003).

Markelz, A., Whitmire, S., Hillebrecht, J. and Birge, R., "THz time domain spectroscopy of biomolecular conformational modes," *Phys. Med. Biol.* 47, 3797–3805 (2002).

Nahata, A., Yardley, J. T., and Heinz, T. F., "Two-Dimensional Imaging of Continuous-Wave Terahertz Radiation using Electro-Optic Detection," *Appl. Phys. Lett.* 81, 963 (2002).

Neetu Jha and S. Ramaprabhu, Thermal conductivity of CNT based Nanofluids, *J. Phys. Chem, C* ; 2008; 112(25); 9315-9319.

Nuss, M. C., and Orenstein, J., in *Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy in Solids*, edited by G. Grüner (Topics in Applied Physics; v. 74, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1998), pp. 7-109

Ohtake, H, Ono, S, Sakai, M, Kawahata, E, Kozeki, T, Murakami, H, Liu, ZL, Tsukamoto, T, Sarukura, N, Development of Intense and Compact THz-radiation Source Using Femtosecond-laser Irradiated InAs Emitter in a High Magnetic Field, *Jour. Of Chinese Chem. Soc.*, 47 609-614, (2000).

Ozer Z, Gok S, Altan H, Severcan F, "Concentration Based Measurement Studies of L-Tryptophan using THz-Time Domain Spectroscopy (THz-TDS)," *Applied Spectroscopy*, 68 1 (2014)

Rice, A. and Jin, Y. and Ma, X. F. and Zhang, X.-C. and Bliss, D. and Larkin, J. and Alexander, M., "Terahertz optical rectification from <110> zinc-blende crystals," *Appl. Phys. Lett.*, 64 1324, (1994).

Schmuttenmaer, C. A. "Exploring dynamics in the far-infrared with terahertz spectroscopy" *Chemical Reviews* 104: 1759–1779 (2004).

Shan, J., Wang, F., Knoesel, E., Bonn, M., and Heinz, T. F., "Measurement of the Frequency-Dependent Conductivity of Sapphire," *Phys. Rev. Lett.* 90, 247401 (2003).

Shen, Y. C., Lo, T., Taday, P. F., Cole, B. E., Tribe, W. E., Kemp, M. C., Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging, *Appl. Phys. Lett.* 86, 241116 (2005).

Siegel, P. H., "Terahertz Technology," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. 50, No. 3, 910 (2002).

Siegel, P. H., "Terahertz technology in biology and medicine," *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques* 52(10), 2438 (2004).

Singh, R. S., Taylor, Z. D., Culjat, M. O., Grundfest, W. S., Brown, E. R., "Towards THz Medical Imaging; Reflective Imaging of Animal Tissues," *Medicine Meets Virtual Reality* 16, 472 – 474 (2008).

Suzuki, M., Tonouchi, M., Fujii, K., Ohtake, H., Hirosumi, T., Excitation wavelength dependence of terahertz emission from semiconductor surface, *Appl. Phys. Lett.* 89, 091111 (2006).

Takahashi, H, Suzuki, Y, Sakai, M, Ono, S, Sarukura, N, Sugiura, T, Hirosumi, T, Yoshida, M, Significant Enhancement of terahertz radiation from InSb by use of a compact fiber laser and an external magnetic field, *Applied Physics Letters* 82 13, (2003).

Tonouchi, M. 2007. "Cutting-edge terahertz technology", *Nature Photonics*, 1, 97-105.

Usami M., Iwamoto and R Fukasawa and M Tani and M Watanabe and K Sakai, "Development of a THz spectroscopic imaging system ," *Phys. Med. Biol.* 47, 3749 (2002)

Wang, F., Shan, J., Knoesel, E., Bonn, M., and Heinz, T. F., "Electronic Charge Transport in Sapphire Studied by Optical-Pump/THz-Probe Spectroscopy," *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering* 5352(Ultrafast Phenomena in Semiconductors and Nanostructure Materials VIII): 216-221 (2004).

Wang, K., and Mittleman, D. M., "Metal Wires for THz Wave Guiding," *Nature* 432, 376–379 (2004).

Wen D. and Y. Ding, Experimental Investigation Into Convective Heat Transfer of Nanofluids at the entranceRegion Under Laminar Flow Conditions, *Int J Heat Mass Transfer* 47(2004),pp,5181-5188

Wen L, Xin C-Y, Yang S-C. The effect of adding dimethyl carbonate (DMC) and ethanol to unleaded gasoline on exhaust emission. *Applied Energy*. 2010;87(1):115–21.

Woodward, R. M., Wallace, V. P., Pye, R. J., Cole, B. E., Arnone, D. D., Linfield, E. H., Pepper, M., Terahertz Pulse Imaging of ex vivo Basal Cell Carcinoma, *J. Invest. Derm.* 120, 78 (2003).

Xu, J., Zhang, X.-C., "Terahertz Wave Reciprocal Imaging," *Appl. Phys. Lett.* 88, 151107 (2006)

Yu, B., Zeng, F., Yang, Y., Xing, Q., Chechin, A., Xin, X., Zeylikovich, I., and Alfano, R. R., "Torsional Vibrational Modes of Tryptophan Studied by Terahertz Time-Domain Spectroscopy," *Biophys J.* 86(3), 1649–1654 (2004).

Zhang, X.-C., Jin, Y., Hu, B. B., Li, X., Auston, D. H., "Optoelectronic study of piezoelectric field in strained-layer superlattices", *Superlattices and Microstructures*, 12, 487-490 (1992).



**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. HAKAN ALTAN
Proje No:	110T849
Proje Başlığı:	Zamana Dayalı Terahertz Ölçüm Ve Görüntüleme Tekniklerinin Geliştirilmesi
Proje Türü:	Kariyer
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	HALİL BERBEROĞLU
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. FEN-EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/04/2011 - 01/04/2014
Onaylanan Bütçe:	285256.0
Harcanan Bütçe:	266315.11
Öz:	<p>Terahertz (THz) dalga boylarına dayanan teknolojiler ve uygulamalar günümüzde yoğun ilgi ile izlenmektedir. Bahsi geçen teknolojiler, günümüz fizik laboratuvarlarında yaygın bir şekilde uygulanmakta olan lazer optiği, malzeme fiziği ve çok hızlı fotonik konularına da ışık tutmaktadır. Bu çeşitli uygulamalar arasında en iyi sonuç alınan yöntemler, atmalı THz spektroskop sistemlerinin geliştirilmesi ve bunların yalıtkan ve yarı-iletken malzemelerdeki uygulamaları ile THz görüntüleme sistemleri ve uygulamaları olmuştur. Atmalı THz spektroskop sistemlerinde üretilen pikosaniye uzunluklardaki THz darbeleri sayesinde bilim insanları hem maddelerin gerçek ve sanal dielektrik katsayılarını anında ölçebilir hem de madde içi dinamik gelişen olayları daha iyi anlayabilmektedirler. THz fotonlarının enerjileri bir kaç meV olduğundan, THz fotonlarıyla sadece yarı-iletken maddelerde değil canlı ve cansız dokularda ve kimyevi/biyolojik maddelerde de dinamik ölçümler gerçekleştirilebilir. Bu proje kapsamında ilk olarak mevcut Terahertz ölçüm sistemlerimizi organik-inorganik, katı-sıvı, iletken-yalıtkan, plazma gibi farklı malzeme türlerine uygulayarak farklı ölçüm kabiliyetleri kazandık.</p> <p>Geliştirdiğimiz teknikler ve elde edindiğimiz bilgiler malzeme karakterizasyon grupları için önemli bir katkı sağladı. İkinci olarak, örnekleri sadece tek boyutta değil üç boyutta inceleyebilen sistemler geliştirdik. Son olarak, bu dalga boylarında farklı malzeme türlerindeki foto-uyarı sonrası değişimleri anlık olarak gözlemleyebilen özgün bir sistem geliştirdik. Dünyada sayılı ülkelerde geliştirilen bu ölçüm yeteneğini ülkemizde ilk defa bu proje kapsamında yapılan destek sayesinde kazanabildik. Geliştirdiğimiz sistemler ve teknikler birçok araştırmacı için faydalı olmuştur. Elde edilen sonuçlar sırasıyla:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Motorin ve benzin arasında belirgin farkların tespiti ve açıklanması</li><li>2. Benzindeki etanol gibi katkı maddelerinin tespiti ve etkisi</li><li>3. Triptofan amino asitin farklı konsantrasyonlarda yeni yöntemler geliştirilerek tespiti</li><li>4. Polimerlerin plazma ortamında güçlendirilmesi ve karakterizasyonu</li><li>5. Deşarj lambalarının THz ışınlarını tespit edebilmesi</li><li>6. Yarı-iletken tabanlı malzemelerin foto-uyarı sonrası tepkileri</li><li>7. Diş ve deri gibi biyolojik dokuların incelenmesi ve üç boyutta görüntülenebilmesi</li><li>8. Dalga kılavuz tipi ızgara yapılarında frekansa dayalı THz geçişlerini etkileyen parametrelerin belirlenmesi</li></ol>
Anahtar Kelimeler:	THz spektroskopisi, THz görüntüleme, Zaman Çözünümlü THz Ölçüm Tekniği, Dalga kılavuzları
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

Proje Den Yapılan Yayınlar:	<p>1- İletken Nano Yapılı Malzemelerin Terahertz Bölgesindeki Davranışları (Bildiri),</p> <p>2- Kısa DC deşarj plazmaların Zamana Dayalı Terahertz Ölçüm Sistemiyle Karakterizasyonu (Bildiri),</p> <p>3- Terahertz Imaging and Point Detection (Bildiri)1- THz transmission and detection through glow discharge detectors (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>2- Characterization of Primary and Adult Teeth Using Terahertz Spectroscopy: Preliminary Findings (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>3- Characterization of a Glow Discharge Detector With Terahertz Time Domain Spectroscopy (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>4- A new method for alcohol content determination of fuel oils by terahertz spectroscopy (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>5- Dielectric Properties of Ethanol and Gasoline Mixtures by Terahertz Spectroscopy and an Effective Method for Determination of Ethanol Content of Gasoline (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>6- Dielectric Properties of Diesel and Gasoline by Terahertz Spectroscopy (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>7- Concentration-Based Measurement Studies of L-Tryptophan Using Terahertz Time-Domain Spectroscopy (THz-TDS) (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>8- Characterization of polypropylene treated under dual-RF plasma using terahertz time-domain spectroscopy (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p>
-----------------------------	--

TÜBİTAK